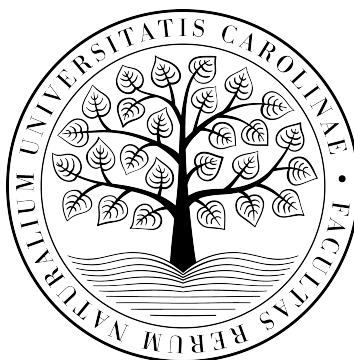


UNIVERZITA KARLOVA  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Günter KYNCL

**ANALÝZA ČAR TERÉNNÍ KOSTRY V PLOCHÁCH SKALNÍCH  
ÚTVARŮ: SROVNÁNÍ INFORMACÍ ODVOZENÝCH ZE ZM 10 A  
DMR 5G**

ANALYSIS OF TERRAIN SKELETON LINES IN ROCKY TERRAIN: COMPARISON OF  
INFORMATION BASED ON ZM 10 AND DMR 5G

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Mgr. Jakub Lysák, Ph.D.

Praha 2022

**Vysoká škola:** Univerzita Karlova  
**Katedra:** Aplikované geoinformatiky a kartografie

**Fakulta:** Přírodovědecká  
**Školní rok:** 2021/2022

# Zadání diplomové práce

**pro** Bc. Güntera Kyncla  
**obor** Kartografie a geoinformatika

**Název tématu:** Analýza čar terénní kostry v plochách skalních útvarů: srovnání informací odvozených ze ZM 10 a DMR 5G.

## Zásady pro vypracování

Hlavním cílem práce je odpovědět na otázku, do jaké míry skalní šrafy ve státním mapovém díle používané pro vyjádření charakteru skalních útvarů odpovídají realitě a nakolik jsou jen dílem fantazie kartografa. Práce bude porovnávat data čar terénní kostry (ČTK) odvozená z kartografických reprezentací, která vznikla v rámci autorovy bakalářské práce, s informacemi odvozenými z DMR 5G, vytvořeného z dat leteckého laserového skenování. Smyslem práce je odpovědět na otázku, nakolik lze automatizovanými postupy z DMR 5G a kartografických reprezentací získat podklad pro automatizovanou tvorbu šraf. Dílčí cíle práce jsou následující:

- seznámení se s metodami pro automatické odvozování ČTK z rastrových DMR,
- praktická (re)implementace vybrané metody aplikované na DMR 5G,
- navržení vhodného způsobu porovnání dvojic ČTK, s důrazem na zapracování většího množství dat a automatizaci,
- vyslovení celkového závěru o míře shody uvedených datových sad na území republiky.

**Rozsah průvodní zprávy:** 80–100 stran

**Seznam odborné literatury:**

DEMEK, J. (1987): Obecná geomorfologie. Academia, Praha.

CHAMBERS, E. W., WANG, Y. (2013): Measuring similarity between curves on 2-manifolds via homotopy area. Proceedings of the twenty-ninth annual symposium on Computational geometry. 425–434.

JAROŠ, J. (2011): Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování. Praha, 2011. 86 s. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.

LYSÁK, J. (2015): Digital rock drawing on Czech topographic maps: the current state and historical circumstances. AUC Geographica, 50, 2, 193–199.

LYSÁK, J. (2016a): Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování. Dizertační práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, PŘF UK, Praha.

LYSÁK, J. (2016b): An algorithm for automated digital rock drawing in the style used in Czech topographic maps. AUC Geographica, 51, 1, 5–16.

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Mgr. Jakub Lysák, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 9. 1. 2021

Termín odevzdání diplomové práce: červenec 2022

*Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.*

.....

Vedoucí diplomové práce

V Praze dne

.....

Vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědom toho, že v případě použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity. Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovateli.

V Praze 29. 7. 2022

.....

Günter Kyncl

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl moc poděkovat vedoucímu mé diplomové práce RNDr. Jakubu Lysákovi, Ph.D. za čas, který mé práci po celou dobu jejího vzniku věnoval, dále za jeho cenné rady a připomínky v průběhu tvorby práce. Dále patří díky Zeměměřickému úřadu za poskytnutí nestandardních dat k mé předchozí (bakalářské) práci, na základě kterých vznikla data využitá v rámci této práce. V neposlední řadě bych chtěl moc poděkovat všem svým blízkým za podporu v průběhu studia a za trpělivost při psaní mé diplomové práce.

## **Analýza čar terénní kostry v plochách skalních útvarů: srovnání informací odvozených ze ZM 10 a DMR 5G**

### **Abstrakt**

Práce se zabývá analýzou čar terénní kostry v plochách skalních útvarů s využitím dat kartografických reprezentací skalních útvarů v Českém státním mapovém díle. Hlavním cílem práce je odpovědět na otázku, do jaké míry skalní šrafy využívané k reprezentaci skalních útvarů odpovídají realitě. V teoretické části práce je popsána metoda, která je v Českém státním mapovém díle využita pro znázorňování skal. Dále je stručně popsán postup, kterým lze z kartografických reprezentací odvodit průběh čar terénní kostry v plochách skalních útvarů, a kterým byla data čar terénní kostry odvozena v rámci autorovy bakalářské práce. Následně jsou stručně popsány vybrané metody pro detekci čar terénní kostry v digitálních modelech terénu v rastrovém formátu, přičemž jedna z nich je zvolena a s úpravami využita v praktické části práce. Další část se zabývá vybranými metodami z oblasti digitálního zpracování obrazu a výpočetní geometrie a poslední část je zaměřena na popis vybraných metod využívaných k určení míry shody liniových objektů.

V úvodu praktické části jsou popsána využitá data. Stěžejní část práce je zaměřena na detailní popis metody využitá k detekci čar terénní kostry. Cílem metody je detekce hřbetnic, údolnic a lomových hran v plochách skalních útvarů na základě DMR 5G. Na tuto část pak navazuje kapitola, v níž je představena navržená metodika k porovnání čar terénní kostry vzniklých z dat kartografických reprezentací (které byly vytvořeny v rámci autorovy bakalářské práce) s čarami vytvořenými na základě DMR 5G. Tyto dvě uvedené kapitoly představují stěžejní část práce. V závěru praktické části jsou prezentovány a částečně interpretovány výsledky srovnání dvou sad čar terénní kostry. Získané výsledky pak umožňují se vyjádřit k zásadním otázkám práce, a to, do jaké míry skalní šrafy využívané k reprezentaci skalních útvarů odpovídají realitě a nakolik lze pomocí automatických postupů z dat kartografických reprezentací a DMR 5G získat podklad pro automatickou kresbu skalních šraf.

### **Klíčová slova**

Skalní útvary, terénní kostra, státní mapové dílo, ZABAGED, DMR 5G.

---

## **Analysis of terrain skeleton lines in rocky terrain: comparison of information based on ZM 10 and DMR 5G**

### **Abstract**

This thesis deals with analysis of terrain skeleton lines in rocky terrain based on cartographic representations of rock formations in Czech state map series. The main aim of the work is to determine how much the representations of rock formations correspond to reality. In the theoretical part the method of rock drawing used in the Czech state map series is described. Then the procedure which was used to derive the terrain skeleton lines from rock formations representations is described. This procedure was for the purpose mentioned above used in author's bachelor thesis. In the next chapter selected methods used for the detection of terrain skeleton lines in digital terrain models are briefly described. Then one of the described methods is chosen and used with modifications in the practical part of this paper. The next section deals with selected methods from the field of digital image processing and computational geometry. The last part is focused on the description of selected methods used to determine the degree of correspondence of linear objects.

In the beginning of the practical part the data used in this work are described. The main part of the thesis is focused on the detail description of the method used to detect the terrain skeleton lines. The aim of the method is to detect ridgelines, valley lines and inner edge lines in rock formations based on DMR 5G. This chapter is followed by a chapter presenting the proposed methodology for the comparison of two sets of terrain skeleton lines. The first set of lines was generated from cartographic representations of rock formations (these lines were created as a part of author's bachelor thesis). The second set of lines was generated from DMR 5G as a part of this work. These two chapters represent a major part of this thesis. At the end of the practical part the results of the comparison of the two sets of terrain skeleton lines are presented and partially interpreted. The obtained results allow us to answer the fundamental questions of this thesis. The first question is how much the rock formations representations correspond to reality. The second one is to what extent can the data of rock formations cartographic representations and DMR 5G be used by automated processes to obtain the input for the automatic creation of rock drawings.

### **Key words**

Rock formations, terrain skeleton lines, state map series, ZABAGED, DMR 5G.

---

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>15</b>
2.1 Znázorňování skal metodou ZÚ	15
2.1.1 Základní popis metody	15
2.1.2 Znázorňování vnitřního členění skalních útvarů	17
2.1.3 Problémy metody ve specifickém terénu	19
2.1.4 Problémy získávání topografické informace z kartografických reprezentací	20
2.2 Odvození ČTK z dat kartografických reprezentací	21
2.2.1 Odvození hřbetnic	21
2.2.1.1 Identifikace hřbetnic v datech kartografických reprezentací	22
2.2.1.2 Odvození nové geometrické reprezentace hřbetnic	25
2.2.2 Odvození lomových hran	28
2.2.2.1 Identifikace lomových hran v datech kartografických reprezentací	28
2.2.3 Odvození údolnic	30
2.2.3.1 Tvorba linií potenciálně reprezentujících údolnice	30
2.2.3.2 Identifikace údolnic a odvození jejich geometrické reprezentace	32
2.3 Vybrané existující metody detekce čar terénní kostry	33
2.3.1 Přehled vybraných dříve publikovaných metod	33
2.3.1.1 Metoda O'Callaghana a Marka (1984)	33
2.3.1.2 Metoda autorů Wild, Krzystek a Madani (1996)	34
2.3.1.3 Metoda autorů Gomes Pereira, Wicherson (1999)	34
2.3.1.4 Metoda autorky Brugelmann (2000)	35
2.3.2 Metoda detekce terénních hran publikovaná Jarošem (2011)	35
2.3.2.1 Detekce ČTK na základě analýzy parametrů terénních tvarů	35
2.3.2.2 Detekce ČTK pomocí metod kartografické generalizace	37
2.4 Digitální zpracování obrazu a výpočetní geometrie	39
2.4.1 Detekce hran v digitálním obraze	39
2.4.1.1 Sobelův operátor	40
2.4.1.2 Cannyho hranový detektor	40
2.4.2 Morfologické filtry	41
2.4.2.1 Dilatace	42
2.4.2.2 Eroze	43
2.4.2.3 Uzavření a otevření obrazu	43
2.4.3 Odvození střední osy objektu za využití Thiessenových polygonů	44

2.5	Vybrané metody pro porovnávání liniových dat	46
2.5.1	Přístupy založené na výpočtu vzdáleností	46
2.5.1.1	Frechétova vzdálenost	46
2.5.1.2	Hausdorffova vzdálenost	46
2.5.2	Ostatní přístupy	47
<b>3</b>	<b>Praktická část</b>	<b>49</b>
3.1	Použitá data	49
3.1.1	Popis dat	49
3.1.1.1	ČTK z kartografických reprezentací a polygony skalních útvarů	49
3.1.1.2	DMR 5G	50
3.2	Detekce čar terénní kostry s využitím DMR 5G	51
3.2.1	Příprava vstupních dat – DMR 5G v okolí skalních útvarů	52
3.2.2	Zpracování digitálního modelu – dekompozice na příčné profily	52
3.2.3	První fáze zpracování příčných profilů – generalizace	53
3.2.4	Detekce jednotlivých typů čar terénní kostry	54
3.2.4.1	Proces detekce čar terénní kostry	56
3.2.4.2	Detekce hřbetnic	57
3.2.4.3	Detekce údolnic	62
3.2.4.4	Detekce lomových hran	63
3.2.5	Tvorba a zpracování výstupů	66
3.2.5.1	Zpracování rastrů s hodnotami významnosti terénních hran	66
3.2.5.2	Převod vybraných segmentů zpracovaných rastrů na linie	70
3.2.5.3	Generalizace vytvořených čar terénní kostry	75
3.3	Porovnání dvojic čar terénní kostry	78
3.3.1	Příprava dat	78
3.3.2	Porovnání ČTK	80
3.4	Výsledky	83
3.4.1	Hřbetnice	83
3.4.1.1	Míra shody na úrovni všech polygonů	83
3.4.1.2	Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů	84
3.4.2	Údolnice	89
3.4.2.1	Míra shody na úrovni všech polygonů	89
3.4.2.2	Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů	90
3.4.3	Lomové hrany	94
3.4.3.1	Míra shody na úrovni všech polygonů	94
3.4.3.2	Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů	95
3.4.4	Celkové výsledky	98
<b>4</b>	<b>Diskuze</b>	<b>101</b>
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>106</b>
	<b>Použité zdroje</b>	<b>108</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>110</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>111</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1	Ukázka reprezentace skalních útvarů vytvořené metodou ZÚ.	15
Obr. 2	Ilustrace tvorby reprezentace skály dle metody ZÚ.	16
Obr. 3	Dvě varianty horních symbolů.	17
Obr. 4	Symbol pro dolní linie.	17
Obr. 5	Hřbetnice zachycená metodou ZÚ.	18
Obr. 6	Údolnice zachycená metodou ZÚ.	18
Obr. 7	Skály s vnitřními lomovými hranami zachycené metodou ZÚ.	19
Obr. 8	Reprezentace liniové hřbetnice a hřbetnice charakteru bodového objektu.	21
Obr. 9	Ilustrace předvýběru horních linií.	23
Obr. 10	Ilustrace nesprávně vybraných horních linií včetně náznaku řešení.	24
Obr. 11	Ilustrace rozlišení hřbetnic a vnitřních lomových hran.	25
Obr. 12	Ilustrace postupu tvorby nové geometrie pro liniové hřbetnice.	26
Obr. 13	Ilustrace tvorby nové geometrie u hřbetnic charakteru bodového objektu.	26
Obr. 14	Vnitřní lomové hrany	28
Obr. 15	Ilustrace části postupu identifikace vnitřních lomových hran.	29
Obr. 16	Ukázka reprezentace údolnice.	30
Obr. 17	Ilustrace reprezentace údolnice a vytvořených linií reprezentujících údolnice.	31
Obr. 18	Tvorba linií reprezentujících údolnice s proměnlivou délkou.	32
Obr. 19	Douglas-Peuckerův algoritmus.	38
Obr. 20	Grafické znázornění bodové množiny.	42
Obr. 21	Příklad aplikace dilatace na binární obraz.	42
Obr. 22	Příklad aplikace eroze na binární obraz.	43
Obr. 23	Odvození střední osy s využitím Thiessenových polygonů.	45
Obr. 24	Modelový profil s vyznačenými terénními hranami.	55
Obr. 25	Detekce hřbetnic – základní parametry.	57
Obr. 26	Modelový profil – detekce hřbetnic.	59
Obr. 27	Detekovaná hřbetnice s vyznačenými parametry pro určení významnosti.	60
Obr. 28	Detekce údolnice – základní parametry.	62
Obr. 29	Možné typy lomových hran.	64
Obr. 30	Zpracování rastrů s hodnotami významnosti terénních hran.	69
Obr. 31	Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů 1/3	71
Obr. 32	Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů 2/3	72
Obr. 33	Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů 3/3	73
Obr. 34	Vektorizace segmentů zpracovaných rastrů – spec. případ.	74
Obr. 35	Modelová linie a myšlenka její generalizace	75
Obr. 36	Modelová linie – proces generalizace 1/2. Vysvětlení v textu.	76
Obr. 37	Modelová linie – proces generalizace 2/2. Vysvětlení v textu.	77

Obr. 38	Ilustrace nalezení blízkých bodů. . . . .	81
Obr. 39	Vybrané polygony s hřbetnicemi. . . . .	85
Obr. 40	Histogram – rozdíl počtu bodů obou datových sad – hřbetnice. . . . .	86
Obr. 41	Histogram – podíl blízkých bodů – hřbetnice. . . . .	87
Obr. 42	Histogram – průměrná odchylka blízkých bodů – hřbetnice. . . . .	88
Obr. 43	Histogram – rozdíl počtu bodů obou datových sad – údolnice. . . . .	91
Obr. 44	Histogram – podíl blízkých bodů – údolnice. . . . .	92
Obr. 45	Histogram – průměrná odchylka blízkých bodů – údolnice. . . . .	93
Obr. 46	Histogram – rozdíl počtu bodů obou datových sad – lomové hrany. . . . .	96
Obr. 47	Histogram – podíl blízkých bodů – lomové hrany. . . . .	96
Obr. 48	Histogram – průměrná odchylka blízkých bodů – lomové hrany. . . . .	97
Obr. 49	Ukázka skalního útvaru s nereálnými lomovými hranami. . . . .	103
Obr. A.1	Emp. distribuční funkce – rozdíl počtu bodů – hřbetnice. . . . .	111
Obr. A.2	Emp. distribuční funkce – procentuální rozdíl počtu bodů – hřbetnice. . . . .	112
Obr. A.3	Emp. distribuční funkce – podíl blízkých bodů – hřbetnice. . . . .	112
Obr. A.4	Emp. distribuční funkce – průměrná odchylka blízkých bodů – hřbetnice. . . . .	113
Obr. A.5	Emp. distribuční funkce – rozdíl počtu bodů – údolnice. . . . .	114
Obr. A.6	Emp. distribuční funkce – procentuální rozdíl počtu bodů – údolnice. . . . .	115
Obr. A.7	Emp. distribuční funkce – podíl blízkých bodů – údolnice. . . . .	115
Obr. A.8	Emp. distribuční funkce – průměrná odchylka blízkých bodů – údolnice. . . . .	116
Obr. A.9	Emp. distribuční funkce – rozdíl počtu bodů – lomové hrany. . . . .	117
Obr. A.10	Emp. distribuční funkce – procentuální rozdíl počtu bodů – lomové hrany. . . . .	117
Obr. A.11	Emp. distribuční funkce – podíl blízkých bodů – lomové hrany. . . . .	118
Obr. A.12	Emp. distribuční funkce – průměrná odchylka blízkých bodů – lom. hrany. . . . .	118

### Poznámky k obrázkům

- obrázky, u kterých není uveden zdroj jsou dílem autora,
- v případě, že byly k tvorbě obrázku využita data, jež nejsou dílem autora, jsou data a jejich zdroj u obrázku citovány.

## Seznam tabulek

Tab. 1	Počty jednotlivých objektů – použitá data.	50
Tab. 2	Rozdělení polygonu dle výskytu různých typů linií.	80
Tab. 3	Základní rozdělení polygonů dle výskytu typů hřbetnic.	83
Tab. 4	Hodnoty parametrů pro vybrané polygony.	84
Tab. 5	Základní statistiky parametrů míru shody pro hřbetnice.	86
Tab. 6	Základní rozdělení polygonů dle výskytu typů údolnic.	89
Tab. 7	Základní statistiky parametrů určujících míru shody pro údolnice.	90
Tab. 8	Základní rozdělení polygonů dle výskytu typů lomových hran.	94
Tab. 9	Základní statistiky parametrů určujících míru shody pro lomové hrany.	95
Tab. 10	Vybrané statistické údaje – výstupy analýz dvojic ČTK.	98
Tab. 11	Počty polygonů, s více typy kartografických linií zároveň.	99
Tab. 12	Počty polygonů, s více typy referenčních linií zároveň.	100

# 1 Úvod

Skály, jakožto význačné objekty v rámci terénu, byly objektem lidského zájmu již v dřívějších dobách. Lidská pozornost se nejprve upírala ke skalám jako takovým, tedy jako k často dominantním objektům přírodní krajiny. V průběhu let se pak na skály začalo nahlížet z různých pohledů lidské činnosti. Jedním z těchto pohledů je problematika znázorňování skalních útvarů v mapách, což kvůli jejich specifickým vlastnostem představuje zajímavý a často velmi složitý úkol. Pro znázorňování skal na mapách bylo vytvořeno velké množství metod využívajících různé vyjadřovací prostředky pro dosažení co nejlepší kartografické reprezentace. Na Českých základních topografických mapách se využívá metoda vytvořená Zeměměřickým úřadem (dále ZÚ), která je založená na digitálním zpracování žebříčkové manýry (Lysák 2016a).

Předkládaná diplomová práce se zabývá analýzou kartografických reprezentací skalních útvarů vytvořených na základě metody používané ZÚ. Analýza spočívá v porovnání čar terénní kostry v plochách skalních útvarů odvozených z dat kartografických reprezentací, vzniklých v rámci autorovy bakalářské práce, s čarami terénní kostry odvozenými na základě Digitálního modelu reliéfu 5. generace (dále DMR 5G). Hlavním cílem uvedeného počínání je přinést odpověď na otázku, do jaké míry skalní šrafy využívané k reprezentaci skal odpovídají realitě a nakolik vznikly na základě fantazie kartografů. Na základě výsledků práce je následně možné se vyjádřit k tomu, do jaké míry lze s využitím automatických postupů z dat kartografických reprezentací a DMR 5G získat podklad pro automatizovanou kresbu skalních šraf.

Práce tak svým zaměřením navazuje na autorovu bakalářskou práci, která byla zaměřena na odvození vybraných topografických informací z dat kartografických reprezentací. Jedním z výstupů bakalářské práce byla právě data čar terénní kostry odvozená z kartografických reprezentací. Tato data jsou v rámci diplomové práce porovnána s daty odvozenými z DMR 5G, na základě čehož lze získat odpovědi na výše naznačené otázky.

Dílčím cílem předkládané práce je se seznámit s využívanými postupy pro automatickou detekci ČTK v rastrových datech. Na základě seznámení se s vybranými existujícími metodami je zvolena konkrétní metoda, která je s určitými úpravami využita pro získání ČTK v plochách skalních útvarů s využitím DMR 5G. Tím jsou získána data o průběhu tří typů čar terénní kostry – hřbetnic, údolnic, lomových hran – stejně jako v případě datové sady získané z dat kartografických reprezentací. Následně je na základě vlastností obou datových sad navržena metoda pro jejich porovnání a určení míry vzájemné shody. Získané výsledky jsou pak podkladem pro vyjádření se k celkové míře shody obou datových sad.

Rešeršní část práce je věnována popisu metody využívané ZÚ pro znázorňování skal na základních mapách. V další části je popsán postup, kterým lze odvodit ČTK v plochách skalních

útvárů na základě jejich reprezentací, přičemž postup je popsán relativně stručně, jelikož odvození těchto dat je náplní autorovy bakalářské práce, nikoliv předkládané diplomové práce. Dále jsou v rešeršní části popsány vybrané metody detekce ČTK z rastrových dat. Následující část se zabývá existujícími přístupy k určování míry shody liniových objektů. Poslední část zahrnuje vybrané metody z oblasti digitálního zpracování obrazu a výpočetní geometrie.

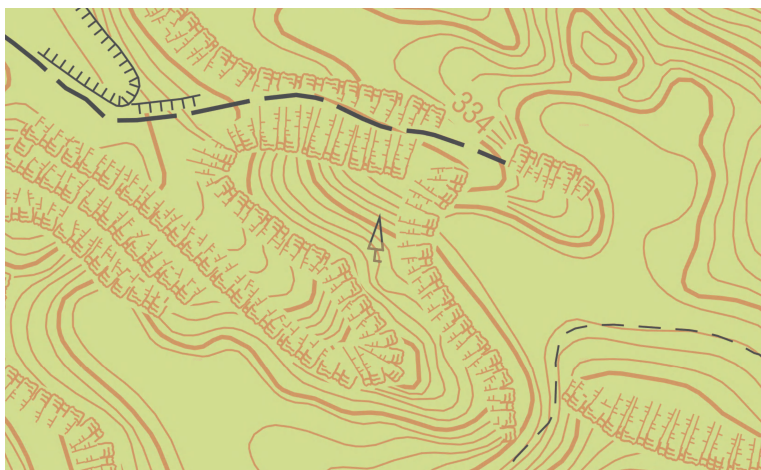
V metodické části práce jsou nejprve představena použitá data. Stěžejní část je pak věnována detailnímu popisu metod pro odvození ČTK v plochách skalních útvarů s využitím DMR 5G. Další významná část je zaměřena na popis metodiky využití k porovnání liniových sad. V závěru metodické části jsou prezentovány a částečně interpretovány získané výsledky. Celkové shrnutí a diskuze dosažených výsledků práce jsou uvedeny v rámci posledních dvou kapitol práce.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Znázorňování skalních útvarů na mapách metodou využívanou Zeměměřickým úřadem na základních mapách

#### 2.1.1 Základní popis metody

Metoda, která byla vytvořena Zeměměřickým úřadem pro znázorňování skalních objektů na mapách, se v současné využívá na základních mapách ve dvou měřítkách – 1 : 10 000 a 1 : 25 000. Základem metody je digitální zpracování žebříčkové manýry s tím, že se jedná o poměrně rozumný kompromis mezi množstvím vynaložené manuální práce a výslednou kvalitou vzniklé reprezentace (Lysák 2016a). Na obrázku č. 1 je uvedena ukázka reprezentace skal, která vznikla využitím této metody.

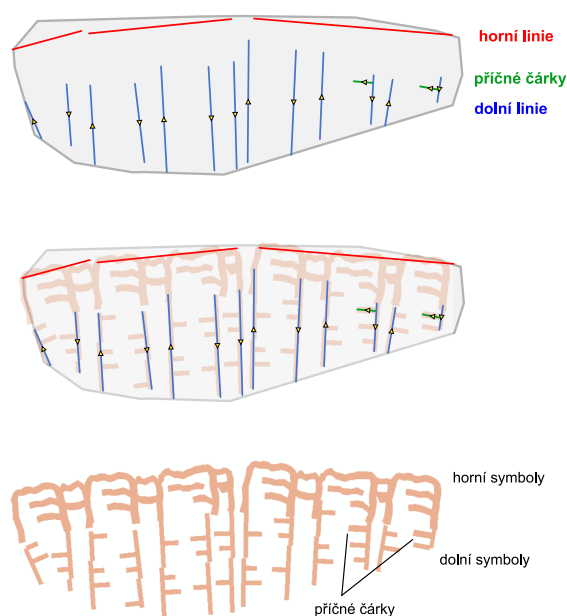


*Obr. 1: Ukázka reprezentace skalních útvarů vytvořené metodou ZÚ.  
Výřez z digitální verze ZM 10.  
Zdroj: ©ÚZK, 2018.*

Pro vytvoření kartografické reprezentace daného skalního útvaru jsou využity dva typy objektů:

- polygon odpovídající půdorysu daného skalního útvaru,
- linie podobné stylizovaným šrafiám sloužící k vyplnění polygonu.

Dílčí šrafy nejsou kresleny jednotlivě, avšak jsou vytvořeny speciální liniové symboly, jejichž vhodná kombinace vede k efektivnější tvorbě reprezentace, jež by měla co nejlépe vypovídat o charakteru daného skalního útvaru. Polygon odpovídající půdorysu skalního útvaru není v mapě přímo zobrazen, ale je využit jen k odmaskování vrstevnic (Lysák 2016a). Linie, kterými je polygon vyplněn jsou dvojího druhu – tzv. horní a dolní liniové symboly. Tyto symboly vyplňují příslušné části polygonů skalního útvaru. Na obrázku níže (obr. č. 2) je znázorněn proces tvorby výsledné kartografické reprezentace na základě linií nakreslených kartografem prostřednictvím liniových symbolů.



**Obr. 2:** Ilustrace tvorby reprezentace skály dle metody ZÚ.  
Zdrojová data: ©ČÚZK, 2019.

Prvním krokem při tvorbě reprezentace je tvorba horních symbolů, které jsou tvořeny ve dvou variantách lišících se výškou (viz obr. č. 3). U obou variant je v rámci jedné skupiny symbolů využito více různých symbolů, čímž dochází ke zvýšení nepravidelnosti výsledné kresby. Horní symboly jsou následně využity pro tvorbu tzv. **horních linií**, které jsou tvořeny za sebou uspořádanými horními symboly. Při tvorbě tak není nutné nakreslit jednotlivě každý symbol, ale stačí nakreslit horní linii a příslušný kartografický software na jejím základě vytvoří výslednou reprezentaci tvořenou horními symboly, které jsou správně umístěné, natočené a zároveň na sebe navazují. Co se týče umístění, horní linie se umísťují podél horních hran

polygonů, tedy kopírují lokálně nejvyšší místa v daném skalním útvaru. Horní linie jsou jednotně orientovány, a to tak, že směr dolů je napravo od dané linie. Jelikož cílem je získat nepravidelnou reprezentaci, tak je namísto jedné propojené horní linie většinou umístováno spíše více kratších nenavazujících horních linií (Lysák 2015, Lysák 2016a, Lysák 2016b).



**Obr. 3:** Dvě varianty horních symbolů.  
Zdrojová data: ©ČÚZK, 2019.

Po vyplnění části polygonu horními symboly zbývá vyplnit jeho zbylou část, k čemuž jsou využity tzv. **dolní linie**. V rámci daného polygonu jsou dolní linie umístěny tak, že kopírují směr spádu a zároveň navazují na horní symboly. Dolní linie jsou v daném polygonu vytvořeny pouze pokud po umístění horních symbolů zůstane určitá část polygonu nepokrytá, tzn. nemusí být umístěny vždy. Kresba dolních linií je doplněna krátkými příčnými čárkami (příčkami) (viz obr. č. 2), které slouží ke zvětšení vizuálního zaplnění plochy polygonu. Příčky jsou ve většině případů kresleny v prostoru pod širšími horními symboly a jsou kresleny pouze na jedné (pravé) straně dolních linií. V rámci polygonu se orientace dolních linií pravidelně mění, a pro dolní linie tak stačí definovat pouze jeden symbol, aby byla dodržena podmínka, že by příčky měly směřovat do prostoru pod širší horní symbol (viz obr. č. 2). Příklad symbolu pro dolní linii je zachycen na obrázku č. 4.



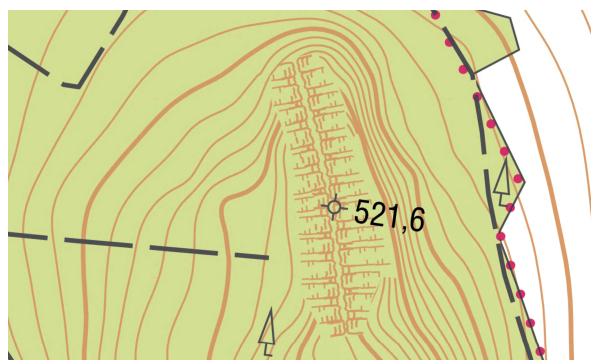
**Obr. 4:** Symbol pro dolní linii.  
Zdrojová data: ©ČÚZK, 2019.

### 2.1.2 Znázorňování vnitřního členění skalních útvarů

Z výše uvedeného základního popisu vyplývá, že je možné metodu využít pro zachycení vnitřního členění skalního útvaru. Pro účely práce jsou podstatné tři typy objektů charakterizujících vnitřní členění:

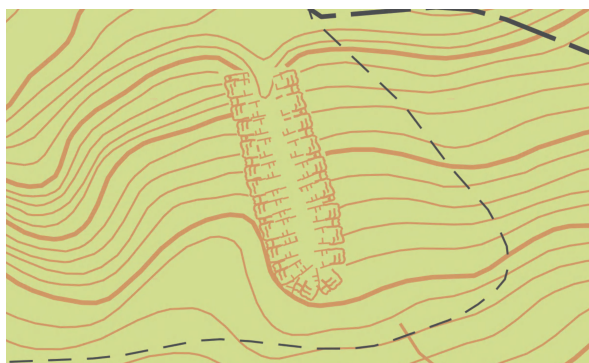
- hřbetnice,
- údolnice,
- vnitřní lomová hrana.

**Hřbetnice** představuje linii reprezentující styk dvou přilehlých skalních stěn daného hřbetu. Zároveň hřbetnice odpovídá spojnici relativně nejvyšších bodů v rámci daného objektu a má ze všech spádnic v ploše hřbetu nejmenší sklon (Demek 1987). Ke znázornění hřbetnice metodou ZÚ je využita dvojice protisměrných horních linií. Ukázka reprezentace skalního útvaru s hřbetnicí je na obrázku č. 5.



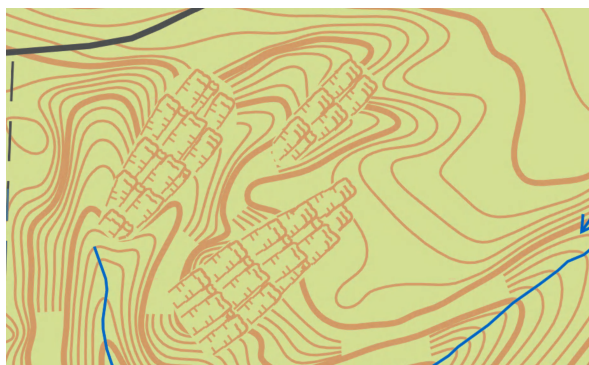
**Obr. 5:** Hřbetnice zachycená metodou ZÚ.  
Výřez z digitální verze ZM 10.  
Zdroj: ©ČÚZK, 2018.

Jako **údolnice** je označena linie, která kopíruje místa největšího vhloubení údolí. V rámci daného objektu má ze všech spádnic nejmenší sklon (Demek 1987). Co se týče kartografické reprezentace, tak metodou ZÚ je údolnice zachycena tím způsobem, že se v daném místě setkávají uvnitř polygonu ukončené dolní linie dvou protilehlých skalních stěn. Skalní útvar obsahující údolnici je znázorněn na obrázku č. 6.



**Obr. 6:** Údolnice zachycená metodou ZÚ.  
Výřez z digitální verze ZM 10.  
Zdroj: ©ČÚZK, 2018.

**Vnitřní lomové hrany** (dále jen lomové hrany) jsou takové linie, na nichž dochází k výrazné změně sklonu, přičemž od lomové hrany se skalní útvar snižuje pouze v jednom směru (narozdíl od hřbetnice) (Lysák 2016a). K zachycení lomových hran se využívají samotné horní linie umístěné v ploše daného polygonu. S využitím lomových hran je následně (teoreticky) možné například zaznamenat stupňovité členění skalního útvaru, kdy se polygon vyplní sérií horních a dolních linií, které leží nad sebou (viz obr. č. 7).



*Obř. 7: Skály s vnitřními lomovými hranami zachycené metodou ZÚ.  
Výřez z digitální verze ZM 10.  
Zdroj: ©ČÚZK, 2018.*

### 2.1.3 Vybrané problematické aspekty aplikace metody na specifické typy skalního terénu

Při aplikaci metody nastávají určité situace, kdy je zachycení daného specifického typu terénu náročné a výsledek není úplně optimální, resp. je v rozporu se základními logickými principy metody.

Jedním z problémů jsou plošně rozsáhlé objekty. V případě, že se jedná o skalní sráz příliš velký ve směru spádnic, tak je problematické vyplnění velké plochy. Logicky správné by bylo v takovém případě plochu vyplnit dolními liniemi, což však nepůsobí úplně dobře po grafické stránce. Řešení těchto situací je prováděno třemi způsoby: nepravidelným rozmístováním dolních linií, jejich umělým kroucením a vlněním nebo pak přidáním řad horních symbolů. Poslední možnost je však částečně v rozporu s logikou samotné metody – výsledná reprezentace může evokovat výskyt lomových hran, ačkoliv se v rámci objektu reálně nevyskytují (Lysák 2015, Lysák 2016a).

Další problém nastává v případě úzkých skalních útvarů, jenž jsou protáhlé ve směru spádu. Tyto objekty jsou většinou řešeny vložím horních linií a objekt lze pak vnímat jako rozčleněný řetěz skal s orientací po spádnici (Lysák 2016a).

Dále je problematické, pokud je horní hrana polygonu výrazně delší než dolní hrana. V takovém případě dochází ke křížení dolních linií v dolních částech polygonu. Toto se řeší zkrácením vybraných dolních linií. Naopak, pokud je dolní hrana delší než horní, tak vznikají prázdná místa, která jsou zaplňována zkrácenými dolními liniemi (Lysák 2016a).

Nejvíce problematické je zachycení skalního reliéfu v pískovcových skalních městech, a to primárně z důvodu velké členitosti reliéfu a nedostatku místa pro kresbu skal. V těchto typech reliéfu se vyskytuje velké množství jednotlivých skal (skalních věží), jejichž relativní blízkost znemožňuje kresbu jednotlivých symbolů. K zachycení terénu jsou tak využity jednotlivé horní symboly s orientací ve směru globálního spádu. To znamená, že nejsou zachyceny jednotlivé skalní útvary a reprezentace tak nese informaci pouze o výskytu skal a náznaku jejich rozčlenění (Lysák 2015, Lysák 2016a).

#### 2.1.4 Vybrané problémy při získávání topografické informace z dat kartografických reprezentací

Během vytváření kartografické reprezentace skalních útvarů se neočekávalo, že by reprezentace měla jednou sloužit jako podklad pro získání topografických informací o skalních objektech. Zpětné odvození topografických informací je tak komplikováno řadou kroků, které byly provedeny během procesu tvorby reprezentace, s cílem zvýšit nepravidelnost výsledné kartografické kresby. V této podkapitole jsou tedy uvedeny určité postřehy ohledně omezení a problémů, které je nutné dále zohlednit.

Při tvorbě reprezentace jsou horní linie segmentovány, tzn. je umístěno několik kratších ne- navazujících segmentů namísto jedné dlouhé linie, aby bylo docíleno určité nepravidelnosti v kresbě. Toto není vhodné vzhledem k využití horních linií pro odvození vybraných informací, například pro identifikaci hřbetnic nebo obvodových hran polygonu, a tak je při zpracování dat nutné provést určité kroky s cílem snížit míru segmentace a vytvořit delší propojené segmenty (Kyncl 2020).

V případě dolních linií jsou dva zásadní problémy. Prvním je orientace dolních linií v rámci polygonu, resp. jejich střídavě se měnící orientace. Orientace linií je měněna proto, aby pro tvorbu reprezentace stačil jen jeden liniový symbol. Tato skutečnost poměrně komplikuje zpracování dolních linií a bylo by určitě vhodnější, pokud by dolní linie měly jednotnou orientaci (například po spádnicí), což by zjednodušilo například identifikaci údolnic nebo klasifikaci obvodových hran polygonu skalního útvaru (Kyncl 2020).

Druhým problémem pak představují příčné čárky. Ty jsou součástí geometrie dolních linií a v datech nejsou žádným způsobem odlišeny. V rámci reprezentace jsou příčné čárky kresleny zpravidla kolmo na dolní linie, což způsobuje problémy v případě postupů využívajících dolních linií nakreslených ve směru spádu (pouze nakreslených, orientace se střídavě mění). Příkladem takových postupů je identifikace údolnic nebo klasifikace obvodových hran polygonů. V těchto situacích příčné čárky přináší komplikace a je třeba výskyt příčných čárek určitým způsobem potlačit (Kyncl 2020)

## 2.2 Odvození vybraných čar terénní kostry z dat kartografických reprezentací

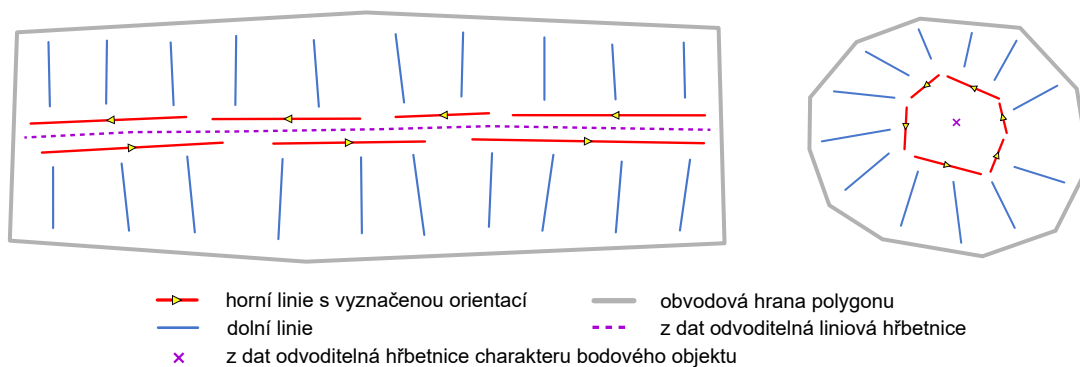
V rámci této kapitoly budou popsány postupy, kterými je možné odvodit průběh ČTK na základě dat kartografických reprezentací skalních útvarů. Jedná se o postupy, pomocí kterých byly odvozeny kartografické linie, jejichž srovnání s „realitou“ reprezentovanou referenční sadou ČTK je jednou z hlavních náplní této práce. Text je rozdělen do tří částí. První část je věnována odvození hřbetnic, druhá část odvození lomových hran a třetí část je zaměřena na odvození průběhu údolnic.

Odvození průběhu čar terénní kostry z dat kartografických reprezentací je náplní autorovy bakalářské práce, v následujícím textu jsou pouze shrnuty hlavní kroky využitých postupů.

### 2.2.1 Odvození hřbetnic

V této podkapitole bude popsán způsob, kterým byly identifikovány hřbetnice v datech kartografických reprezentací, z nichž byly následně odvozeny přímo linie odpovídající průběhu hřbetnic. V první části textu je popsán postup pro identifikaci hřbetnic v datech kartografických reprezentací a druhá část se zabývá odvozením jejich nové liniové reprezentace.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, **liniová hřbetnice** je reprezentována dvojicí vzájemně poměrně blízkých a protisměrně orientovaných horních linií. V prostoru mezi dvojicí horních linií se pak teoreticky nachází z dat odvoditelná hřbetnice (viz obr. 8 vlevo), která však není přímo součástí těchto dat, ale je třeba její průběh odvodit a vytvořit její geometrickou reprezentaci. **Hřbetnice charakteru bodového objektu** jsou v datech představovány malými objekty, v nichž se nachází do kruhu uspořádané horní linie (viz obr. 8 vpravo). Pokud je vnitřní prostor vymezený horními liniemi dostatečně malý, je objekt vyhodnocen jako bodová hřbetnice, která je následně reprezentována bodem umístěným přibližně ve středu oné oblasti (viz obr. 8 vpravo) (Kyncl 2020).



**Obr. 8:** Reprezentace liniové hřbetnice (vlevo) a hřbetnice charakteru bodového objektu (vpravo).  
Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

### 2.2.1.1 Identifikace hřbetnic v datech kartografických reprezentací

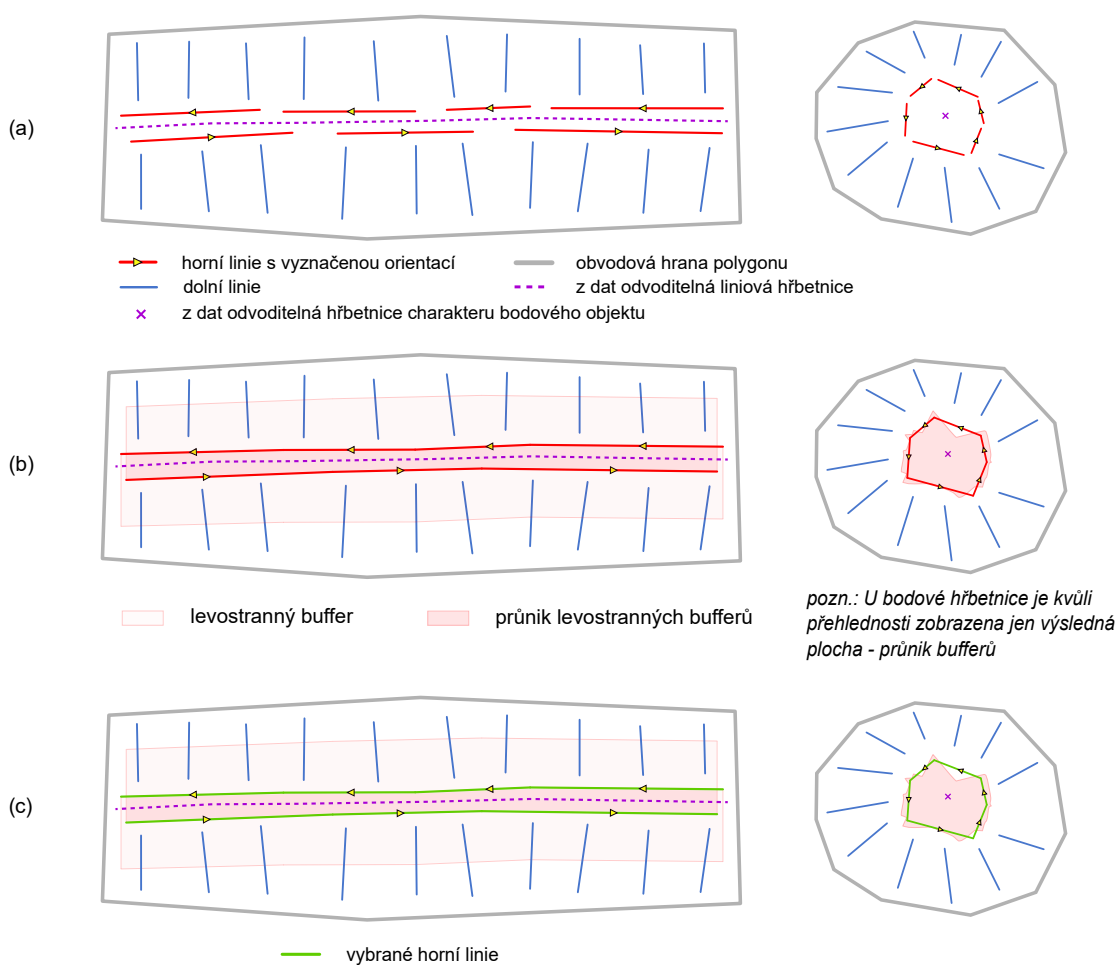
Hřbetnice obou druhů jsou reprezentovány výše popsaným, specifickým uspořádáním horních linií, tzn. prvním krokem k získání jejich nové reprezentace je nalezení těchto specifických situací. Všechny horní linie mají jednotnou orientaci (směr dolů vždy napravo), což v případě hřbetnic znamená, že dvojice horních linií na přilehlých svazích budou orientovány protisměrně a zároveň každá horní linie bude mít nalevo od sebe horní linii přilehlého svahu (je patrné z obrázku č. 8 vlevo). Pro hřbetnice bodové charakteru bude platit, že na levé straně horních linií bude prostor jimi vymezený (viz obr. č. 8 vpravo). Postup pro identifikaci hřbetnic pak zjednodušeně spočívá ve výběru horních linií, které leží uvnitř plochy vzniklé jako průnik levostranných bufferů nad horními liniemi (Kyncl 2020).

Před vytvořením bufferů a výběru linií jsou nejprve horně linie upraveny následujícím způsobem:

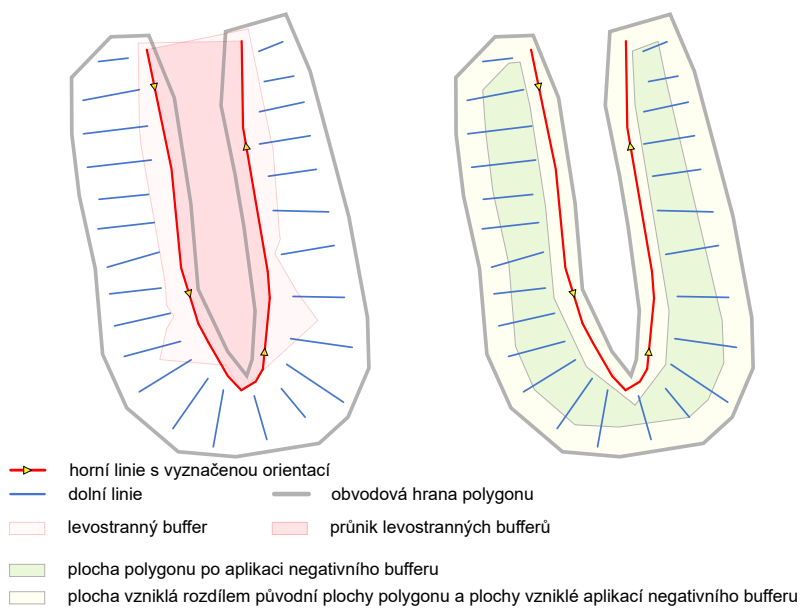
- jsou v obou směrech prodlouženy o 2 m,
- prodloužené linie jsou pospojovány, v případě, že je vzdálenost jejich koncových bodů menší než 3 m.

Nad upravenými horními liniemi je poté vygenerován levostranný *flat* buffer o šířce 16 m. Tento buffer bude u liniových hřbetnic směřovat do prostoru mezi dvojicí horních linií a u bodových hřbetnic do prostoru, který vymezují (viz obrázek č. 9 b). V dalším kroku je vytvořena plocha odpovídající průniku obou bufferů, která v případě hřbetnic odpovídá ploše mezi horními liniemi (viz obr. č. 9 b). Dalším krokem je výběr upravených horních linií, které mají průnik s vytvořenou plochou (průnik levostranných bufferů) – viz obr. č. 9 c. Uvedený postup by měl ideálně zajistit výběr těch horních linií, které potenciálně reprezentují hřbetnice. Postup je ilustrován na obrázku č. 9 (Kyncl 2020).

Uvedený postup vede v některých případech k výběru nežádoucích horních linií, které nerepresentují hřbetnice. Typickým případem jsou horní linie, které jsou umístěny blízko okraje polygonů skalních útvarů, přičemž hlavním důvodem výběru těchto linií je relativně velká šířka použitého levostranného bufferu. U velmi blízkých polygonů nebo u zahnutých polygonů mohou být tyto horní linie nesprávně vybrány a označeny jako součást reprezentace hřbetnice (viz obr. č. 10 vlevo). K eliminaci takto vybraných horních linií byl využit negativní buffer o šířce 5 m vytvořený nad polygony skalních útvarů. Pokud potom střed dané horní linie neleží v ploše vzniklé jako rozdíl plochy polygonu a negativního bufferu, tak je horní linie z výběru odstraněna (Kyncl 2020). Uvedený postup je znázorněn na obrázku č. 10.



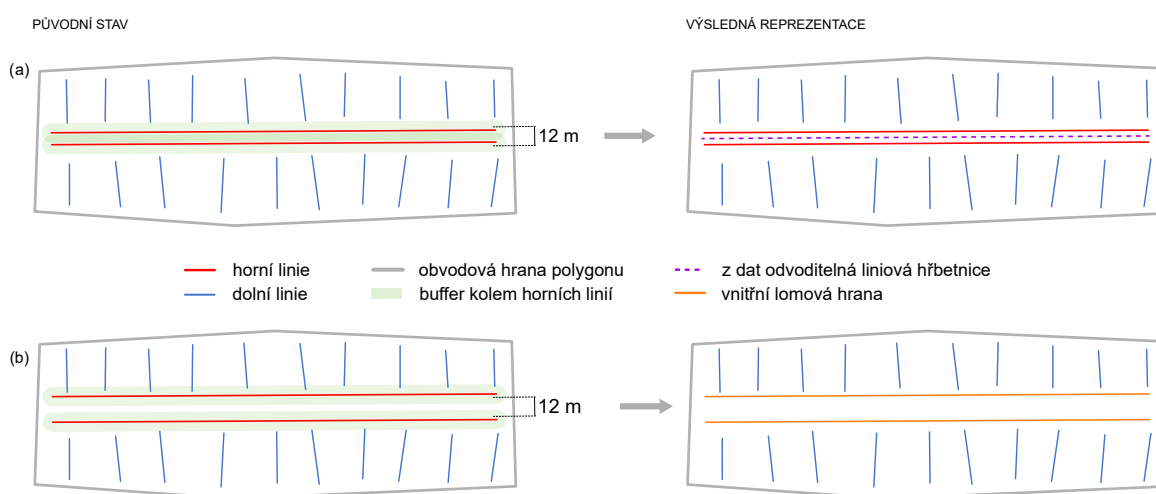
**Obr. 9:** Ilustrace předvýběru horních linií (vysvětlení v textu).  
 Zdroj: převzato z Kyncl 2020.



**Obr. 10:** Ilustrace nesprávně vybraných horních linií (vlevo) včetně náznaku řešení (vpravo).  
Vysvětlení v textu.

### 2.2.1.2 Odvození nové geometrické reprezentace hřbetnic

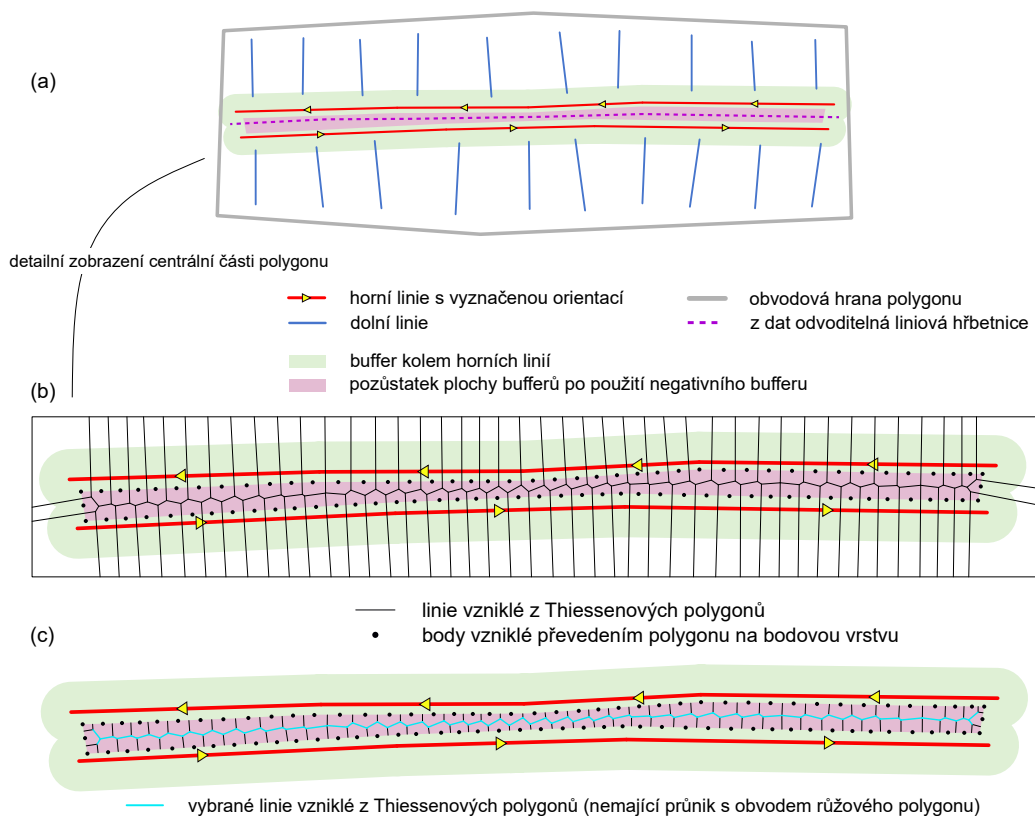
V následujícím textu je postup pro odvození a vytvoření nové geometrické reprezentace hřbetnic (liniových i bodových). Nejprve je zvolena mezní hodnota, pomocí které jsou následně odlišeny hřbetnice od lomových hran. Tato mezní hodnota odpovídá maximální vzdálenosti dvojice protisměrných linií, které reprezentují liniovou hřbetnici, resp. průměru vnitřní plochy v případě hřbetnic charakteru bodových objektů a je rovna 12 m. To znamená, že pokud bude vzdálenost horních linií menší než tato hodnota, tak budou považovány za reprezentaci hřbetnice, pokud ne, tak jsou linie považovány za lomové hrany (viz obr. č. 11) (Kyncl 2020).



**Obr. 11:** Ilustrace rozlišení hřbetnic (a) a vnitřních lomových hran (b).  
Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

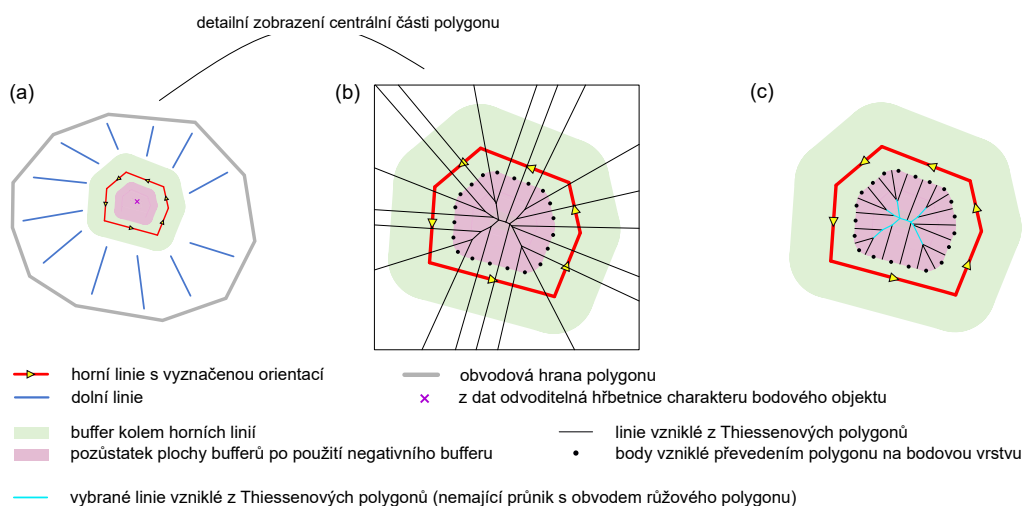
Kolem výběru horních linií je následně vytvořen oboustranný buffer o šířce odpovídající polovině mezní hodnoty – tedy 6 m. Tyto vytvořené buffery se překryjí v případě, že vzdálenost dvojice protisměrných horních linií bude menší než mezní hodnota 12 m (viz obr. č. 12 a), resp. pokud průměr plochy u bodových hřbetnic bude menší než 12 m (viz obr. č. 13 a). Vytvořené buffery jsou dále spojeny v jeden objekt a jsou v něm zaplněny drobné díry, které by mohly negativně ovlivnit výsledek (Kyncl 2020).

Na plochu vzniklou spojením bufferů je v dalším kroku aplikován negativní buffer o šířce 7 m, což povede k tomu, že v místech, kde byly horní linie blíže než mezní hodnota (12 m) zůstane určitá plocha (viz obrázek č. 12). Stejně tak určitá plocha zůstane v případě hřbetnic bodového charakteru bližších než daná mez (viz obr. č. 13). V ostatních situacích plocha po aplikaci negativního bufferu zanikla nebo zůstala pouze velmi malá (Kyncl 2020).



**Obr. 12:** Ilustrace postupu tvorby nové geometrie pro liniové hřbetnice.  
Vysvětlení v textu.

Zdroj: převzato z Kyncl 2020.



**Obr. 13:** Ilustrace postupu tvorby nové geometrie u hřbetnic charakteru bodového objektu.  
Vysvětlení v textu.

Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

Vzniklé plochy dle velikosti a tvaru rozdělit do 3 kategorií:

1. plošky mající protáhlý tvar a pravděpodobně reprezentující liniovou hřbetnici,
2. plošky s kruhovým tvarem pravděpodobně odpovídající hřbetnici charakteru bodového objektu,
3. plošky velmi malé velikosti (do 25 m<sup>2</sup>) a různého tvaru, nerepresentující žádný typ hřbetnice.

V případě prvních dvou kategorií byla na základě tvaru plošky vytvořena příslušná nová reprezentace daného typu hřbetnice. Pro liniové hřbetnice to znamená linii procházející přibližně středem plošky a pro bodové hřbetnice to znamená bod odpovídající přibližně těžišti dané plošky. Nejprve jsou všechny plošky z první a druhé kategorie převedeny na linie (konkrétní postup uveden dále), přičemž následně je na základě vzdálenosti dvou nejvzdálenějších bodů této linie rozhodnuto, jestli daný objekt reprezentuje liniovou či bodovou hřbetnici (Kyncl 2020).

Postup pro vytvoření liniové geometrie na základě vytvořených plošek zahrnuje následující kroky:

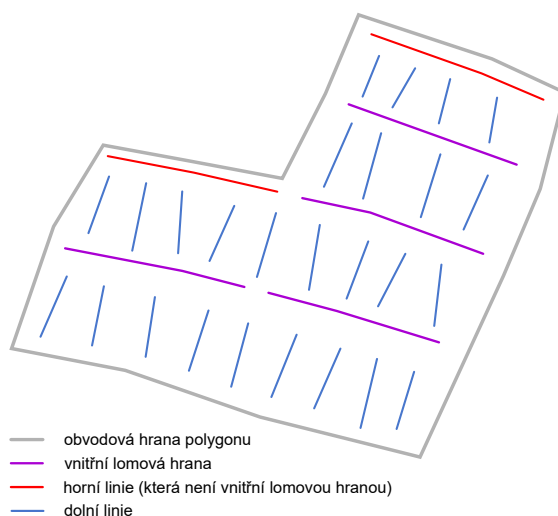
- Generalizace plošek (odstranění přebytečných vrcholů na obvodové linii s 2m tolerancí).
- Navzorkování obvodové linie body s krokem 1 m.
- Vytvoření Thiessenových polygonů nad vzniklými body a jejich oříznutí na plochu původní plošky – viz obrázky č. 12, 13 – b,c.
- Převod oříznutých Thiessenových polygonů na linie.
- Výběr linií vzniklých v minulém kroku, které nemají průnik s obvodem původní plošky – viz obrázky č. 12, 13 – c.

Tímto postupem byly u liniových hřbetnic získány linie přibližně odpovídající jejich očekávanému průběhu. U hřbetnic charakteru bodového objektu vznikly relativně krátké liniové segmenty. Pro takto vzniklé linie byly spočítány vzdálenosti dvou jejich nejvzdálenějších vrcholů. Pokud byla tato vzdálenost menší než 5 m, tak byl daný objekt označen jako hřbetnice charakteru bodového objektu a byl vytvořen bod odpovídající těžišti původní plošky. V případě, že byla vzdálenost větší než 5 m byla daná linie označena jako liniová hřbetnice (Kyncl 2020).

## 2.2.2 Odvození lomových hran

Cílem této kapitoly je popsat způsob, kterým lze na základě kartografických reprezentací odvodit průběh lomových hran.

**Lomové hrany** jsou linie reprezentující případné vnitřní členění skalního útvaru (například jeho stupňovité členění). V datech kartografických reprezentací jim odpovídají horní linie umístěné v ploše polygonu, které zároveň neleží u horního okraje daného polygonu a zároveň nerepresentují hřbetnici, viz například obr. č. 14



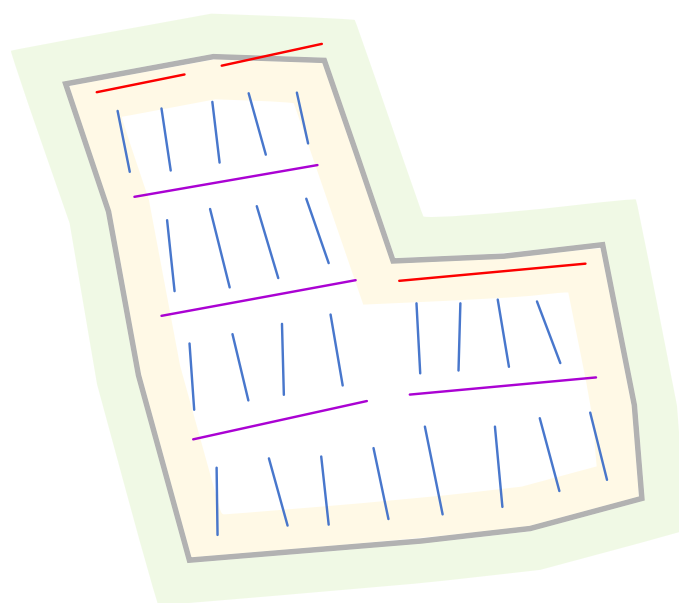
**Obr. 14:** Vnitřní lomové hrany.  
Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

### 2.2.2.1 Identifikace lomových hran v datech kartografických reprezentací

Identifikace lomových hran je provedena postupnou eliminací horních linií, které leží u okrajů polygonů a horních linií, jež reprezentují hřbetnice. Po uvedené eliminaci zbylé horní linie by měly ideálně odpovídat lomovým hranám.

V prvním kroku jsou nalezeny horní linie neležící v blízkosti okraje polygonů skalních útvarů. To je provedeno za využití 6m negativního bufferu, který je aplikován na polygony skalních útvarů. Rozdílem původní plochy polygonu a plochy po aplikaci negativního bufferu vznikl 6m pás na vnitřním obvodu polygonu (viz obrázek č. 15). Následně byl pomocí 6m bufferu vytvořen pás také na vnějším okraji polygonů (viz obr. č. 15). Pásky na vnitřním i vnějším okraji byly dále spojeny v jeden objekt. Nakonec byly vybrány horní linie, jejich střed neleží v ploše vzniklé spojením obou pásů, což zajistilo výběr horních linií neležících u okrajů polygonů (Kyncl 2020).

V druhém kroku je třeba z výběru linií neležících u okrajů polygonů vybrat ty linie, které nerepresentují hřbetnice. To je provedeno za využití plošek uvedených v předešlé kapitole (podkapitola 2.2.1), z nichž byla odvozena geometrická reprezentace liniových a bodových hřbetnic. Uvedeným postupem tak byly vybrány horní linie odpovídající lomovým hranám.



- obvodová hrana polygonu
- vnitřní lomová hrana
- horní linie (která není vnitřní lomovou hranou)
- dolní linie
- buffer kolem polygonu
- plocha vzniklá rozdílem původní plochy polygonu a plochy vzniklé aplikací negativního bufferu

**Obr. 15:** Ilustrace části postupu identifikace vnitřních lomových hran.

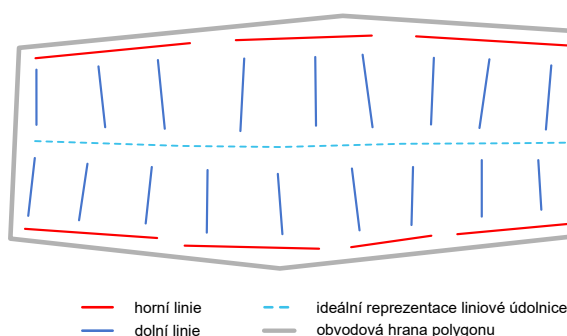
Vysvětlení v textu.

Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

### 2.2.3 Odvození údolnic

V této kapitole je popsán postup pro identifikaci údolnic, resp. pro vytvoření jejich nové geometrické reprezentace. Údolnice se oproti dvěma výše uvedeným ČTK liší, a to tím, že nejsou v datech nikterak přímo reprezentovány, resp. není možné je získat určitým výběrem z dat. Z toho plyne, že je třeba jako první vytvořit objekty, pomocí kterých bude možné údolnice vybrat. Ukázka reprezentace údolnic v datech je na obrázku č. 16.

Celá kapitola se dělí na dvě části. V první je nastíněn proces, kterým vzniknou linie potenciálně reprezentující údolnice. V druhé je pak postup pro identifikaci z dat vyplývajících údolnic a pro vytvoření jejich nové reprezentace.



**Obr. 16:** Ukázka reprezentace údolnice.

Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

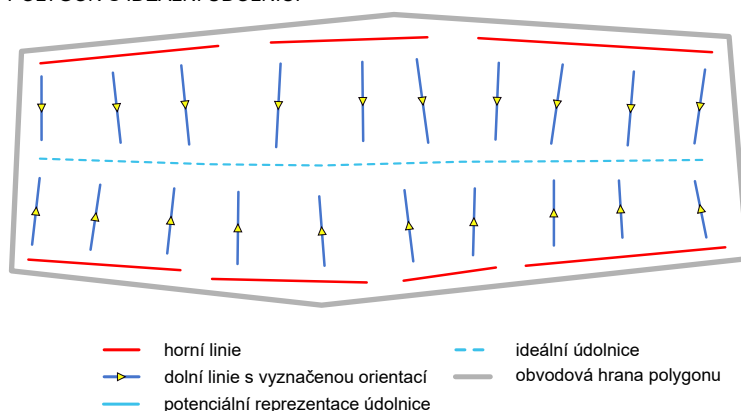
#### 2.2.3.1 Tvorba linií potenciálně reprezentujících údolnice

Linie, které mají potenciálně reprezentovat údolnice jsou vytvořeny s využitím orientovaných dolních linií (tzn. dolních linií upravených tak, že mají jednotnou orientaci). Na konci dolních linií (resp. 0,5 m od konce) jsou vytvořeny kratší liniové segmenty kolmé na dolní linie (viz obr. č. 17).

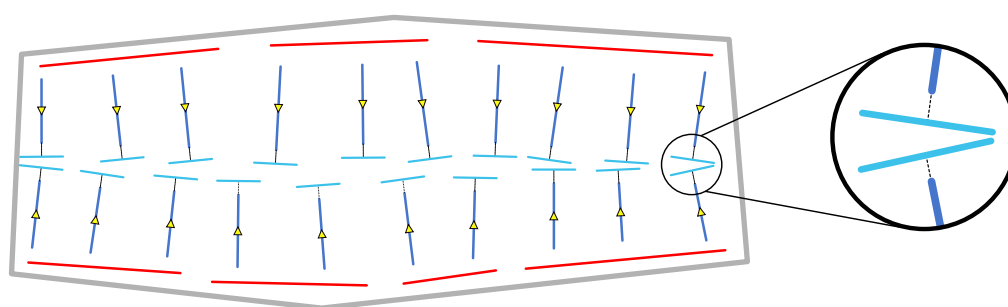
Tyto liniové segmenty jsou dále tvořeny s proměnlivou délkou, aby na sebe co nejlépe navazovaly. Jelikož je však proces tvorby těchto segmentů s proměnlivou délkou poměrně výpočetně náročný, tak je použit pouze v polygonech, kde se očekává přítomnost údolnice. To znamená, že následující postup je takový, že prvně jsou liniové segmenty na koncích dolních linií vytvořeny s konstantní délkou 20 m a pomocí nich je proveden předvýběr polygonů s potenciálním výskytem údolnice. Ve vybraných polygonech jsou pak vytvořeny liniové segmenty o proměnlivé délce (Kyncl 2020)

Vytvořené liniové segmenty potenciálně reprezentující údolnice (v tuto chvíli o délce 20 m) jsou vytvořeny s jednotnou orientací (směr nahoru je napravo). V situacích, kdy liniové segmenty reprezentují údolnici, budou segmenty na koncích dolních linií protilehlých skalních stěn mít opačnou orientaci. Další postup je podobný jako v případě hřbetnic, proto zde popsán jen stručně:

POLYGON S IDEÁLNÍ ÚDOLNÍ



POLYGON S VYTVOŘENÝMI LINIEMI POTENCIÁLNĚ REPREZENTUJÍCIMI ÚDOLNICE



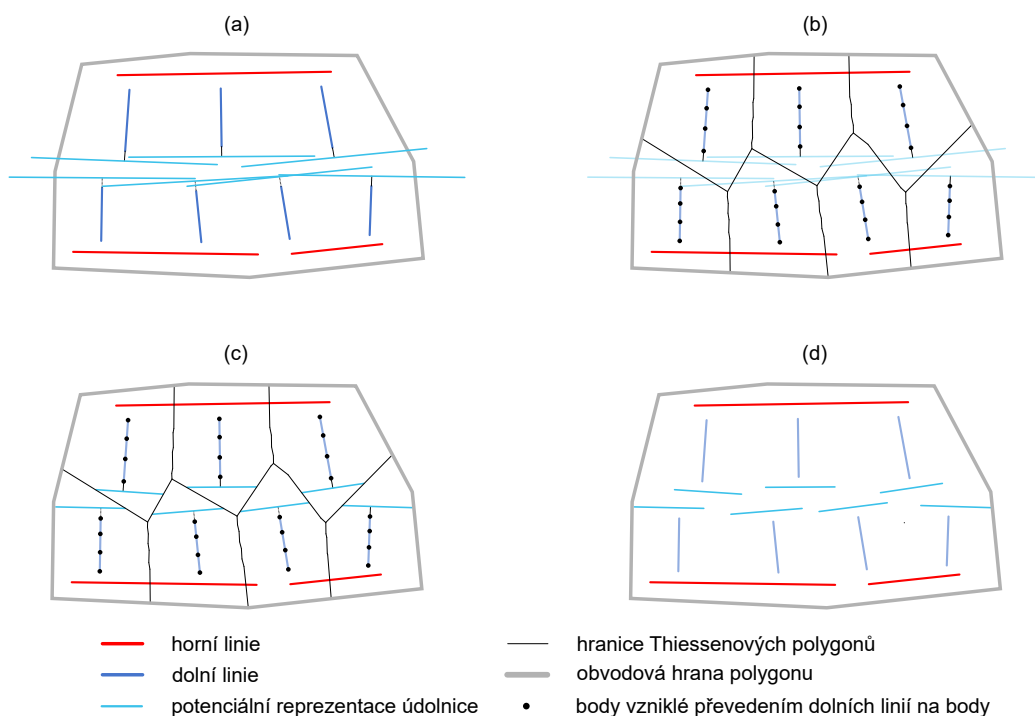
**Obr. 17:** Ilustrace ideální reprezentace údolnice a vytvořených linií potenciálně reprezentujících údolnice.  
Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

- Vytvoření levostranného *flat* bufferu o šířce 16 m kolem lin. segmentů potenciálně reprezentujících údolnice (buffery směřují do prostoru mezi segmenty potenciálně reprezentující údolnice).
- Vytvoření plochy odpovídající průniku bufferů.
- Výběr liniových segmentů potenciálně reprezentujících údolnice majících průnik s plochou odpovídající průniku polygonů.

Na závěr byly pak vybrány polygony skalních útvarů, v nichž leží v přechodném kroku vybrané liniové segmenty. Tím vznikl výběr polygonů, v nichž se potenciálně vyskytují údolnice (Kyncl 2020).

Další kroky směřují k vytvoření liniových segmentů potenciálně reprezentujících údolnice s proměnlivou délkou ve vybraných polygonech, což je klíčové pro následné odvození nové reprezentace údolnic. Ve vybraných polygonech jsou v tuto chvíli vytvořené liniové segmenty potenciálně reprezentující údolnice o délce 20 m, přičemž ty budou v dalších krocích zkráceny dle uspořádání dolních linií v polygonu. V následujícím kroku jsou navzorkovány dolní linie v daných polygonech s krokem 2 m. Nad body vzniklými navzorkováním jsou pak vytvořeny Thiessenovy polygony, které jsou oříznuty dle plochy polygonu. Takto vznikly oblasti

vymezuující plochy náležící příslušným dolním liniím. Pomocí těchto ploch (oříznutých buněk Thiessenových polygonů) byly oříznuty liniové segmenty potenciálně reprezentující údolnice (Kyncl 2020). Uvedený postup je ilustrován na obr. č. 18.



**Obr. 18:** Ilustrace tvorby linií potenciálně reprezentujících údolnice s proměnlivou délkou.  
Zdroj: převzato z Kyncl 2020.

### 2.2.3.2 Identifikace údolnic v datech kartografických reprezentací a odvození jejich nové geometrické reprezentace

Nad polygony, které byly vybrány, jakožto polygony potenciálně obsahující údolnice je pro účely identifikace údolnic proveden výběr s cílem nalézt situace, kdy liniové segmenty potenciálně reprezentující údolnice skutečně reprezentují údolnice. Výběr liniových segmentů je proveden stejně, jako výše při výběru, který sloužil k nalezení polygonů s potenciálním výskytem údolnice. Postup se stejnými parametry byl tedy použit na segmenty potenciálně reprezentující údolnice s proměnlivou délkou, čímž byly nalezeny situace, kde se velmi pravděpodobně vyskytují údolnice (Kyncl 2020)

Na základě provedeného výběru je následně v daných polygonech vytvořena nová geometrická reprezentace údolnic. Postup pro její tvorbu je stejný jako v případě liniových hřbetnic, s tím, že mezní hodnota vzdálenosti protisměrných linií byla zvolena na 14 m (a následně použitý buffer má tedy šířku 7 m). V případě údolnic nejsou rozlišovány objekty bodového charakteru a vznikají tedy pouze liniové údolnice (Kyncl 2020).

## 2.3 Vybrané existující metody detekce čar terénní kostry

Detekce hran v datech, které popisují průběh terénu je v rámci geoinformatiky poměrně časté téma, jímž se zabývala celá řada odborných publikací. Publikované přístupy se odlišují v řadě aspektů – například v datovém modelu vstupních dat, ve vymezení detekovaných tvarů, v univerzálnosti, ... Co se týče datového modelu, jedná se většinou o původní bodové mračno nebo jsou data v rastrové podobě. Postupy se také samozřejmě liší základním využitým principem – existují přístupy založené na analýze odtokových poměrů, hranových operátorech, ..., přičemž ve většině případů se různé přístupy i datové modely kombinují s cílem dosáhnout co nejlepšího výsledku (Jaroš 2011).

Tato kapitola je rozdělena na dvě části. První část nabízí přehled vybraných publikovaných metod pro detekci terénních hran. Druhá část je pak věnována podrobnějšímu popisu metody, která byla použita a dále rozpracována v rámci diplomové práce.

### 2.3.1 Přehled vybraných dříve publikovaných metod

Výběr níže popsaných metod byl inspirován prací Jaroše (2011), která obsahuje výčet a detailní popis významných doposavad publikovaných metod. Vybrané metody jsou níže popsány spíše stručně, jelikož jejich detailní popis není pro účely práce až tak zásadní. Zároveň je popis zaměřen hlavně na metody pracující se vstupními daty v rastrovém formátu, a to s ohledem na záměr této práce. Největší pozornost je věnována metodě publikované Jarošem (2011), která byla využita (s určitými úpravami) pro detekci čar terénní kostry v praktické části práce.

#### 2.3.1.1 Metoda O'Callaghana a Marka (1984)

Metoda publikovaná dvojicí autorů O'Callaghan a Mark (1984) patří mezi relativně starší metody. Základem metody je analýza odtokových poměrů v dané lokalitě. Postup byl původně určený k využití v hydrologii a geomorfologii, ale v průběhu času nalezl uplatnění právě při detekci terénních hran a je tak často implementován v různých obměnách v GIS softwarech.

Vstupem metody je model terénu v rastrové podobě. Nejprve je vytvořen rastr směrů odtoků, v němž má každý pixel hodnotu v rozmezí 1–8 reprezentující směr odtoku v daném místě. Směr odtoku je určen na základě procházení pixelů v okolí daného pixelu a zkoumáním jejich nadmořské výšky, s tím, že odtok bude směřovat do pixelu s nejnižší výškou, pokud výška nejnižšího pixelu bude zároveň menší než pixelu analyzovaného. S využitím rastru se směry odtoků je vytvořen další rastr. V novém rastru jsou pixely klasifikovány do 4 kategorií:

- pixel na rozvodnici: do pixelu nesměruje odtok z jiného pixelu, ale z daného pixelu odtok směřuje (nemá přítok, má odtok),
- pixel součástí toku: do pixelu směřuje odtok z jednoho jiného pixelu a z daného pixelu směřuje odtok do jiného pixelu (má 1 přítok a 1 odtok),
- pixel odpovídající soutoku: má více přítoků a pouze jeden odtok,

- pixel bez odtoku: nemá žádný odtok.

V dalším kroku jsou eliminovány bezodtoké oblasti a následně již mohou být získány odtokové dráhy (říční síť). Ty jsou získány jako výstup iterativního výpočtu, v němž se kumulativně sčítají počty přítoků v pixelech. Na základě výstupu lze získat informace o průběhu údolnic a hřbetnic, jelikož platí, že údolnice budou kopírovat říční síť a hřbetnice budou odpovídat rozvodnicím.

### 2.3.1.2 Metoda autorů Wild, Krzystek a Madani (1996)

Autoři této metody navrhují postup, kdy je detekce terénních hran přímo součástí tvorby digitálního modelu reliéfu. V rámci postupu je analyzována křivost a torze vstupního DMR v rastrovém formátu, přičemž je využito hranového filtru zachovávajícího hrany. Na základě tohoto filtru jsou v DMR hledána lokální maxima křivosti, která představují první odhad průběhu terénních hran. Tato místa jsou v první fázi reprezentována body, přičemž dále jsou propojeny do 3D liniových objektů, které jsou první nejjednodušší aproximací průběhu terénních hran. Dále je na rastr aplikován Sobelův hranový operátor, který nalezne další potenciální terénní hrany. Výsledné terénní hrany jsou detekovány tam, kde se 3D linie vzniklé na základě hranového filtru zachovávajícího hrany shodují s hranami nalezenými pomocí Sobelova operátoru. Posledním krokem je pak zapracování terénních hran do DMR.

### 2.3.1.3 Metoda autorů Gomes Pereira, Wicherson (1999)

Oproti dvěma předchozím metodám, kdy jsou vstupní data ve formě rastrového digitálního modelu, přicházejí Gomes, Pereira a Wicherson (1999) s metodou detekce hran z bodových dat leteckého laserového skenování. Terénní hrany jsou pro účely práce chápány jako spojnice bodů zlomu, jenž odpovídají místům náhlých změn sklonů terénu. Autoři pracují s třemi typy hran označenými jako střecha, svah a schod, přičemž tyto typy představují aproximaci skutečných hran v reálném terénu. Očekává se, že hrany typu schod budou reprezentovat primárně neterénní objekty (např. budovy), zároveň však platí, že většina neterénních objektů je odstraněna v rámci procesu filtrace, a tak se s těmito hranami již dále nepracuje. Postup se dále zaměřuje spíše na detekci tvarů typu vyvýšenina, hráz atd., přičemž hledání ČTK není přímo cílem práce.

Pro detekci hran je využit Prewittův hranový operátor, na základě kterého dojde ke zvýraznění míst s náhlou změnou hodnot pixelů. Následně je vytvořen rastr, němž jsou pixely rozděleny dle toho, jestli se vyskytují v rovině (získají hodnotu 0) nebo ve svahu (získají hodnotu odpovídající sklonu). Body zlomu jsou pak nalezeny pomocí ztenčování, přičemž se vychází z úvahy, že hrany (resp. pixely reprezentující hrany) se budou nacházet na rozhraní ploch (rovin a svahů). Pro každý pixel s nenulovou hodnotou se prochází jeho osmiokolí a zkoumá se, jestli minimálně jeden z okolích pixelů leží na rovině (hodnota 0) a zároveň minimálně jeden leží ve svahu (hodnota větší než 0). Pokud taková situace nastane, tak je analyzovaný pixel označen jako pixel hrany. Nakonec jsou detekované hrany reprezentovány vektorově a obsahují informaci, jestli reprezentují horní nebo dolní hranu svahu.

### 2.3.1.4 Metoda autorky Brugelmann (2000)

Autorka pracuje s terénními hranami ve formě 3D linií, které odpovídají spojnicím míst, v nichž se vyskytují lokální maxima křivosti. Za základní terénní hrany autorka považuje hřbetnice, údolnice a další hrany, jež významně ovlivňují průběh terénu. Detekce hran je zahrnuta v rámci procesu segmentace rastru s hodnotami nadmořských výšek, přičemž k popisu průběhu terénu jsou využity dva základní typy tvarů – tvarově homogenní souvislé plochy a diskontinuity v terénu.

Dosáhnout segmentace je možné dvěma základními přístupy. První spočívá v klasifikaci pixelů výškového rastru dle hodnot křivosti, na což navazuje shlukování pixelů podobných hodnot do větších oblastí s podobnými hodnotami. Druhý přístup je založen na přímém vyhledávání diskontinuit v terénu, které následně rozděljuje do 3 kategorií: *jump edge*, *crease edge*, *curvature edge*. Nalezení hran je založeno na úvaze, že hranové pixely se vyskytují primárně na rozhraních homogenních oblastí, tzn. v místech s nízkou mírou homogenity, měřené prostřednictvím gradientu. Míry homogenity je v daných pixelech statisticky testována, přičemž na základě výsledku testu je provedeno rozhodnutí, jestli daný pixel reprezentuje část hrany nebo ne.

### 2.3.2 Metoda detekce terénních hran publikovaná Jarošem (2011)

Tato část je věnována podrobnějšímu popisu metody pro detekci terénních hran vytvořené Jarošem (2011), která je využita v rámci praktické části diplomové práce pro odvození ČTK v plochách skalních útvarů.

Metoda je založena na konstrukci a analýze příčných profilů nad digitálním modelem terénu. Autor představuje v práci dva zásadní algoritmy pro detekci terénních hran, první z nich je založený na analýze parametrů terénních tvarů a druhý na aplikaci kartografické generalizace. Rozdílnost algoritmů je dána hlavně způsobem, kterým jsou generalizovány příčné profily, resp. způsobem kterým dochází k výběru významných terénních hran v rámci profilů. Oba algoritmy budou níže popsány, s tím, že větší pozornost je věnována druhému algoritmu, který byl taktéž zvolen pro použití v této práci.

#### 2.3.2.1 Detekce ČTK na základě analýzy parametrů terénních tvarů

V rámci tohoto algoritmu je vyhlazení příčných profilů, tj. odlišení významných a méně významných hran, provedeno na základě analýzy zvolených parametrů terénních tvarů. Každá terénní hrana musí být tvořena dvěma svahy s různým sklonem nebo expozicí, příp. obojím. Zkoumanými parametry pak jsou *úhel, který svírají svahy tvořící hranu, převýšení hrany oproti okolnímu terénu a délka svahů tvořících hranu*.

Pro vyhodnocení hran je pak nutné zohlednit všechny tři parametry zároveň. Následně je možné vhodnou volbou mezních hodnot uvedených parametrů docílit potlačení hran, které nejsou při dané míře podrobnosti významné. Na základě volby mezních hodnot parametrů má pak uživatel možnost nastavit potřebnou míru podrobnosti s níž proces detekce pracuje (Jaroš 2011).

Algoritmus je schopen detekovat tři typy hran – hřbetnice, údolnice, lomové hrany. Běh al-

goritmu probíhá tak, že daný rastr digitálního modelu terénu je postupně zpracováván po příčných profilech ve 4 směrech: ve směru řádků, sloupců a obou diagonál. Nejprve jsou všechny pixely v rámci daného profilu rozklasifikovány do 4 skupin:

- pixely představující rovinu,
- pixely součástí svahu,
- pixely součástí hřbetnice,
- pixely součástí údolnice.

Rozčlenění je provedeno na základě testování výšek tří sousedních pixelů. Pokud jsou mezi pixely minimální rozdíly (menší než stanovená mezní hodnota), tak je prostřední pixel vyhodnocen jako pixel roviny. Pro pixel hřbetnice platí, že první a třetí pixel mají menší nadmořskou výšku než pixel prostřední, v opačném případě se pak jedná o pixel součástí údolnice. Pro pixel svahu musí platit, že jeden ze sousedních pixelů je výše a druhý níže vůči pixelu prostřednímu. Uvedeným procesem jsou detekovány všechny hrany a svahy. V dalším kroku je třeba vybrat ty významné, resp. potlačit ty nevýznamné. U každého pixelu označeného jako součást hrany je hodnoceno, jestli svahy danou hranu tvořící splňují požadavky kladené na významnou hranu (čímž jsou prahové hodnoty 3 uvedených parametrů stanovené předem uživatelem) (Jaroš 2011).

Z provedeného testování parametrů nalezených hran získáme informaci o tom, které hrany jsou významné a v profilu tak mají zůstat, a naopak které hrany významné nejsou a mají být vyhlazeny. Vyhlazení profilu je provedeno tak, že ke každé nevýznamné hraně jsou nalezeny její nejbližší sousední hrany a mezi pixely odpovídajícími těmto významným hranám je provedena lineární interpolace. Tím se docílí toho, že pixely původně tvořící svahy a samotnou nevýznamnou hranu získají novou hodnotu nadmořské výšky. Následně je třeba opět provést hodnocení, jestli tyto nově ohodnocené pixely představují rovinu, či svah. Proces vyhlazování je opakován do té doby, dokud v profilu nezůstanou pouze významné hrany. Nakonec je pro pixely v rámci profilu nalezena jejich původní poloha v původním rastru a pixelům s odpovídajícími souřadnicemi v nově vytvořeném rastru je přiřazena hodnota 1, pokud odpovídají hraně, nebo 0, pokud nikoliv (Jaroš 2011).

Celý rastr je postupně zpracováván po jednotlivých příčných profilech, které jsou vytvářeny ve 4 různých směrech. To znamená, že po analýze terénu ve všech 4 směrech získáme 4 binární rastry s informací o výskytu/nevýskytu hran. K nalezení všech hran v daném terénu je třeba binární rastry zkombinovat. To je provedeno porovnáváním sobě si polohově odpovídajících pixelů ve 4 binárních rastrech. Pokud pixel s danou polohou nabývá alespoň v jednom rastru hodnoty 1 (reprezentuje část hrany), je mu hodnota 1 přiřazena i ve výsledném rastru. Pokud daný pixel tento požadavek nesplňuje, získává ve výsledném rastru hodnotu 0. Finální rastr tak obsahuje kompletní informaci o průběhu všech terénních hran v dané oblasti (Jaroš 2011).

Uvedený postup je zde popsán primárně z toho důvodu, že byl inspirací pro volbu parametrů zohledňujících významnost terénních hran využitých k vytvoření koeficientů míry významnosti pro jednotlivé typy ČTK v praktické části práce.

### 2.3.2.2 Detekce ČTK pomocí aplikace poznatků kartografické generalizace

V přechodí kapitole byl popsán způsob výběru významných terénních hran na základě testování hodnot zvolených parametrů vůči nastaveným mezním hodnotám. V této podkapitole je představena druhá možná varianta k vyhlazení příčných profilů, a to za využití principů kartografické generalizace.

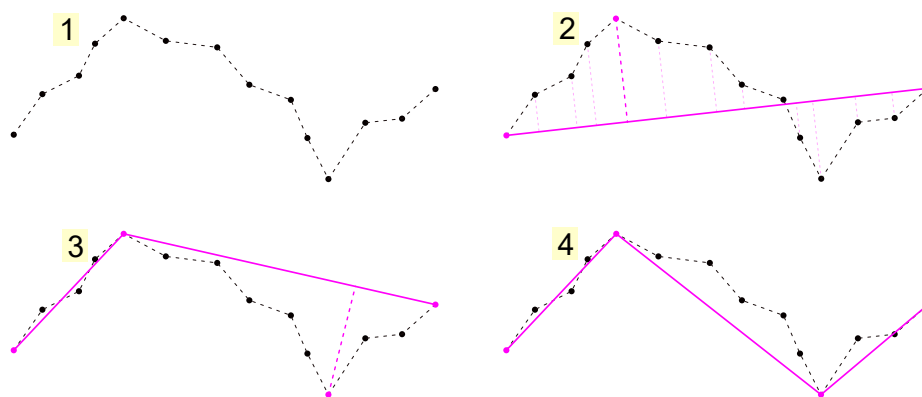
Základní myšlenka spočívá v globálním vyhodnocení celého profilu. Na profil je nahlíženo jako na celek, v němž jsou hledány jeho nejvýznamnější terénní rysy. V rámci postupu jsou jako první detekovány nejdominantnější terénní tvary a od nich se postupuje k těm méně významným, což zajišťuje vyšší míru efektivity vůči předchozímu přístupu. Pro vyhlazování profilu je konkrétně využit *Douglas-Peuckerův* algoritmus pro generalizace vektorových linií.

Konkrétně to znamená, že daný příčný profil je generalizován za využití tohoto algoritmu, díky čemuž v něm zůstávají pouze body odpovídající významným terénním hranám a ty méně významné jsou potlačeny. Míra generalizace je pak volitelným parametrem, což zajišťuje, že si uživatel může určit s jakou mírou podrobnosti chce pracovat. V následujícím textu je princip Douglas-Peuckerova algoritmu stručně popsán a vysvětlen.

**Douglas-Peuckerův algoritmus** Algoritmus je označován jako globální, tj. generalizace se provádí s ohledem na celkový tvar linie, což zajišťuje zachování charakteristických rysů této linie. Prvním krokem je nalezení počátečního a koncového bodu dané linie a jejich spojení úsečkou. Tato úsečka představují nejhrubší generalizaci dané linie. Dále je pro všechny mezilehlé lomové body vypočtena kolmá vzdálenost k této úsečce a je nalezen bod, pro nějž je vzdálenost největší. V tomto bodě je následně v prvním kroku vytvořená úsečka rozdělena na dvě části. První část úsečky vede od počátečního bodu k tomuto bodu, přičemž část druhá pak od tohoto bodu ke koncovému bodu původní úsečky, resp. původní linie. Dále je možné pro obě vzniklé úsečky také vypočítat vzdálenosti k příslušným mezilehlým lomovým bodům a výše popsaný proces provést znovu. Postup lze na základě jeho vlastností implementovat rekurzivně, přičemž počet opakování je určen na základě předem zvolené minimální kolmé vzdálenosti úsečky a lomových bodů. Pokud pro všechny lomové body platí, že jejich kolmá vzdálenost od dané úsečky je menší než zvolená mezní hodnota, je proces ukončen. K ukončení dojde také v případě, že k dané úsečce již neexistuje žádný bod (Douglas, Peucker 1973). Postup je ilustrován na obr. č. 19.

Douglas-Peuckerův algoritmus je nutné mírně modifikovat, aby jej bylo možné využít na ke generalizaci příčných profilů. Jednotlivé příčné profily je třeba chápat jako linii, jejíž vrcholy tvoří jednotlivé pixely profilu. Poloha bodů, resp. vrcholů pomyslné linie je určena vzdáleností pixelu od počátku profilu a jeho nadmořskou výškou. Dále je postup analogický ke klasické generalizaci linie. Jen je třeba v průběhu zaznamenávat polohu bodů tvořících významné hrany, které budou ve výsledku tvořit vrcholy, v nichž generalizovaný profil mění směr, aby je bylo možné dohledat v původním profilu. Zbylým bodům je vypočtena nová hodnota nadmořské výšky, která je získána aplikací lineární interpolace na segmenty mezi hranovými body. Tím je pro každý příčný profil získán nový generalizovaný profil (Jaroš 2011).

Stejně jako u předešlého algoritmu je postupným zpracováním rastru ve čtyřech směrech získána čtveřice binárních rastrů s informací o výskytu/nevýskytu hran. Z binárních rastrů je následně stejným způsobem vytvořen rastr výsledný (Jaroš 2011.)



**Obr. 19:** Ilustrace průběhu Douglas-Peuckerova algoritmu.  
Zdroj: vlastní tvorba dle Douglas, Peucker 1973.

Tento algoritmus založený na využití metod kartografické generalizace je základem metody, která byla využita pro detekci ČTK v praktické části práce. Aby bylo možné metodu aplikovat na detekci hran ve skalních útvarech, je třeba ji částečně modifikovat, což je detailně rozepsáno a vysvětleno v kapitole [3.2.4](#).

## 2.4 Teorie z oblasti digitálního zpracování obrazu a výpočetní geometrie

Tato kapitola je věnována vybraným metodám z oblasti digitálního zpracování obrazu, přičemž se jedná o metody, které jsou přímo využity v praktické části práce při zpracování rastrových dat.

### 2.4.1 Detekce hran v digitálním obraze

Hrany v digitálním obraze lze chápat jako místa, kde dochází k náhlým změnám jasu. Jsou dány vlastnostmi obrazového elementu a jeho okolí. 2D obraz lze matematicky chápat jako funkci dvou proměnných  $f(x, y)$ , která je v tomto kontextu označována jako *obrazová funkce*. Hrana je v obraze určena tím, jak náhle dochází ke změně hodnot obrazové funkce  $f(x, y)$ . Z pohledu matematiky lze změny funkce dvou proměnných analyzovat prostřednictvím partiálních derivací. Změnu funkce pak udává její gradient (vektorová veličina  $\nabla$ ), který určuje směr maximálního růstu funkce (směr gradientu) a strmost růstu (velikost, modul gradientu). Pixely s velkým modulem gradientu (tam kde se hodnoty mění strměji) jsou pak označovány jako hrany (Hlaváč, Sedláček 1999).

Velikost gradientu  $|\nabla f(x, y)|$  a jeho směr  $\psi$  lze pro spojitou obrazovou funkci spočítat dle vztahů

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2},$$
$$\psi = \arctan\left(\frac{\partial f}{\partial x} / \frac{\partial f}{\partial y}\right).$$

Pro detekci hran lze využít tzv. gradientní operátory (též hranové detektory), které lze rozdělit na 3 typy:

1. Operátory, které aproximují derivace prostřednictvím diferencí. Některé jsou nezávislé na rotaci, tudíž je lze spočítat konvolucí s jednou maskou. Další aproximují první derivaci, k čemuž využívají několik masek s různou orientací.
2. Operátory hledající hrany v místech, kde druhá derivace nabývá nulových hodnot.
3. Operátory lokálně aproximující obrazovou funkci jednodušším modelem, například polynomem.

Dále budou popsány dva hranové detektory *Sobelův operátor* (patřící do 1. kategorie) a *Cannyho hranový detektor* (patřící do 2. kategorie), které jsou využívány v praktické části práce.

### 2.4.1.1 Sobelův operátor

Jedná se o operátor založený na aproximaci derivací pomocí diferencí. Operátor zohledňuje pro výpočet okolí o velikosti  $3 \times 3$  a je schopen detekovat hrany ve vertikálním i horizontálním směru (Hlaváč, Sedláček 1999).

Konvoluční masky pro Sobelův operátor jsou

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad h_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad h_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Operátor se často využívá pro detekci hran ve vertikálním a horizontálním směru, k čemuž pak stačí pouze masky  $h_1$  a  $h_3$ .

Co se týče praktické implementace, na obraz s hodnotami obrazové funkce jsou aplikovány konvoluční masky aproximující parciální derivaci ve směru osy  $x$  a ve směru osy  $y$ , čímž vzniknou dva nové obrazy s hodnotami aproximujícími parciální derivace v obou směrech. Výsledné hodnoty velikosti a směru gradientu lze pak pro každý pixel obrazu spočítat na základě příslušných hodnot aproximovaných parciálních derivací dle vztahů uvedených výše (Hlaváč, Sedláček 1999).

### 2.4.1.2 Cannyho hranový detektor

Tento hranový detektor zahrnuje více jednotlivých kroků k dosažení co nejlepšího výsledku detekce hran. Jednotlivé kroky algoritmu jsou následující:

1. Redukce šumu v obraze.
2. Výpočet gradientu – nalezení hran.
3. Ztenčení hran – potlačení nemaximálních hodnot.
4. Eliminace málo významných hran – prahování.

Prvním krokem procesu je **redukce šumu v obraze**. To primárně z důvodu, že hranové detektory jsou obecně velmi citlivé na šum v datech. K redukci šumu je využit Gaussovský filtr, který zajistí potlačení skokové změny hodnot jasové funkce. Filtr je použit prostřednictvím konvoluce, na základě vzorce dvourozměrné varianty Gaussova normálního rozdělení

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

kde  $x$  a  $y$  jsou souřadnice pixelu v obraze a  $\sigma$  směrodatná normálního rozdělení, určující míru vyhlazení hran v obraze,

je vypočtena konvoluční maska, která je aplikována na obraz (Hlaváč, Sedláček 1999).

Na obraz po aplikaci Gaussovského filtru je následně aplikován Sobelův operátor, pomocí kterého je **vypočítán gradient**, resp. jeho velikost a směr. Sobelův operátor je aplikován prostřednictvím dvojice konvolučních masek a výpočet velikosti gradientu a jeho směru je proveden výše popsáním způsobem. Na základě hodnot gradientu je následně získána informace o průběhu hran (Hlaváč, Sedláček 1999).

V dalším kroku jsou nalezené hrany ztenčovány za využití metody **potlačení nemaximálních hodnot**. Metoda spočívá v procházení rastru s hodnotami gradientu postupně po pixelech. Pro daný pixel je nalezena hodnota směru hrany, přičemž na základě hodnoty směru hrany jsou vybrány sousední pixely k analyzovanému pixelu. Ty jsou vybrány v kolmém směru na směr průběhu hrany a z této trojice pixelů (analyzovaný pixel a sousední pixely) je ponechán pouze ten s maximální hodnotou gradientu. Uvedeným postupem dojde ke ztenčení hran a zachování pouze lokálně největších hodnot gradientu (Hlaváč, Sedláček 1999).

Nakonec je třeba vybrat pouze ty nejvýznamnější hrany v obraze, resp. eliminovat ty méně významné. K tomu je použito tzv. **prahování s hysterezí**. Jedná se o prahování s využitím dvou prahů. Na začátku se zvolí dva prahy – minimální a maximální. Pixel, jehož hodnota gradientu je vyšší, než maximální práh je automaticky označen jako součást hrany. Pixely s hodnotou gradientu nižší, než minimální práh jsou označeny jako pixely mimo hranu. Pixely s hodnotou gradientu mezi prahy jsou označeny jako součást hrany pouze tehdy, dotýkají-li se hranového pixelu (označeného dříve) (Hlaváč, Sedláček 1999).

Uvedeným postupem je možné získat binární obraz, kde hodnota 1 odpovídá hranám a hodnota 0 zbylým pixelům.

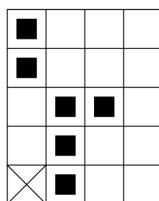
## 2.4.2 Morfologické filtry

Morfologické filtry jsou nástroji tzv. matematické morfologie. Ta představuje obor matematiky zabývající se zjednodušeně zpracováním obrazových dat z matematického pohledu. Základní ideou pro vysvětlení morfologických filtrů je představa, že digitální obraz je možné modelovat prostřednictvím bodových množin (libovolné dimenze).

Binární obraz je možné reprezentovat 2D množinou bodů. Objekty v obraze reprezentované body jsou dáno množinou  $X$  – pixely s hodnotou 1. Doplněk množiny  $X$  pak tvoří pozadí – pixely s hodnotou 0. Počátek obrazu má souřadnice  $(0, 0)$ , souřadnice ostatních pixelů mají stejný význam jako v je v matematickém smyslu obvyklé (Hlaváč, Sedláček 1999). Níže uvedený obraz (obr. č. 20) lze formou množiny zapsat následovně

$$X = \{(1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 2), (0, 3), (0, 4)\}.$$

Pojem *morfologická operace* pak označuje relaci mezi obrazem (množina  $X$ ) a jinou bodovou množinou (většinou menší)  $B$ , která bývá tradičně označována jako *strukturní element*. Strukturní element bývá vztažen k tzv. reprezentativnímu bodu (lze chápat jako „lokální počátek“). Použití morfologické transformace si lze představit jako posouvání strukturního elementu po obraze. V dané poloze strukturního elementu výsledek relace mezi  $X$  a  $B$  zapíšeme do vytvořeného výstupního obrazu (Hlaváč, Sedláček 1999).



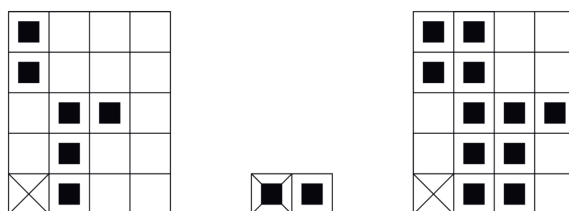
**Obr. 20:** Ilustrační obraz – příklad bodové množiny.  
Počátek je označen křížkem, pixely s hodnotou 1 pak černým čtverečkem.  
Zdroj: převzato z Hlaváč, Sedláček 1999.

Dále jsou popsány dvě konkrétní operace matematické morfologie pro binární obraz – dilatace a eroze.

### 2.4.2.1 Dilatace

*Dilatace* odpovídá vektorovému součtu bodů dvou množin. Dilatace  $X \oplus B$  je pak množina bodů zahrnující všechny možné vektorové součty pro dvojice pixelů – vždy jeden z  $X$  a jeden z  $B$ . Jednoduchý příklad dilatace je uveden na obrázku č. 21, přičemž množinově lze příklad zapsat jako

$$\begin{aligned} X &= \{(1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 2), (0, 3), (0, 4)\} \\ B &= \{(0, 0), (1, 0)\} \\ X \oplus B &= \{(1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 2), (0, 3), (0, 4), (2, 0), (2, 1), (2, 2), (3, 2), (1, 3), (1, 4)\}. \end{aligned}$$



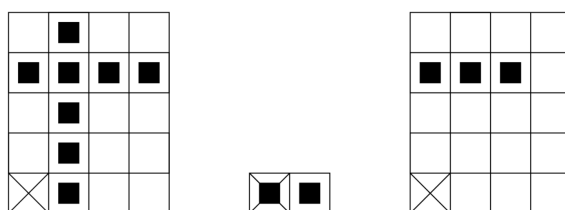
**Obr. 21:** Příklad aplikace dilatace na binární obraz.  
Počátek je označen křížkem, pixely s hodnotou 1 pak černým čtverečkem.  
Zdroj: převzato z Hlaváč, Sedláček 1999.

Pokud se využije isotropický strukturní element (transformace stejná ve všech směrech) tak platí, že se objekty rozrůstají na úkor pozadí ve všech směrech, což má zároveň za následek zaplnění drobných děr v obraze. Například dilatace s isotropickým strukturním elementem  $3 \times 3$  vede ke změně všech bodů v pozadí sousedících s body objektů na body objektů. Dilatace se obecně využívá k vyplnění malých děr, případně úzkých zálivů. Obecně také platí, že dilatace zvětšuje objekty. (Hlaváč, Sedláček 1999).

### 2.4.2.2 Eroze

Eroze představuje duální operaci k dilataci. Při aplikaci eroze se v každém bodě obrazu  $p$  ověřuje, jestli pro všechny možné  $p + b$  leží výsledek v  $X$ . Pokud uvedené platí, v reprezentativním bodě se zapíše hodnota 1, pokud ne, tak hodnota 0 (Hlaváč, Sedláček 1999). Příklad aplikace eroze je uveden na obrázku č. 22, přičemž množinový zápis příkladu je následující

$$\begin{aligned} X &= \{(1, 0), (1, 1), (1, 2), (0, 3), (1, 3), (2, 3), (3, 3), (1, 4)\} \\ B &= \{(0, 0), (1, 0)\} \\ X \ominus B &= \{(0, 3), (1, 3), (2, 3)\}. \end{aligned}$$



**Obr. 22:** Příklad aplikace eroze na binární obraz.  
Počátek je označen křížkem, pixely s hodnotou 1 pak černým čtverečkem.  
Zdroj: převzato z Hlaváč, Sedláček 1999.

Eroze je využívána ke zjednodušení objektů, resp. jejich struktury. Použitím eroze (primárně s isotropickým strukturálním elementem) je možné zmenšit objekty ve prospěch pozadí. Zároveň lze pomocí eroze získat obrys objektu, a to odečtením výsledku eroze od původního obrazu (Hlaváč, Sedláček 1999).

### 2.4.2.3 Uzavření a otevření obrazu

Eroze a dilatace nepředstavují inverzní operace, naopak jejich kombinací vznikají další morfologické transformace – *otevření*, *uzavření obrazu*. Na výstupu obou operací je oproti původnímu zjednodušený obraz s menším množstvím detailů (Hlaváč, Sedláček 2011).

*Otevřením obrazu* rozumíme erozi následovanou dilatací, formálně zapsáno jako

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B.$$

*Uzavřením obrazu* pak odpovídá dilataci následované erozí, zapsáno jako

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B.$$

Oběma postupy s využitím isotropického strukturálního elementu dochází ke generalizaci obrazu, tzn. jsou odstraněny segmenty menší než strukturální element. Otevření vede k oddělení objektů, které jsou spojeny úzkou šíjí. Naopak uzavření vede ke spojení objektů nacházejících se blízko u sebe. Zároveň uzavření vyplní drobné díry a vyhladí obrys (Hlaváč, Sedláček 1999).

### 2.4.3 Odvození střední osy (medial axis) objektu za využití Thiessenových polygonů

Střední osu objektu  $\mathcal{O}$  (*medial axis*) lze definovat jako množinu všech bodů, které mají alespoň dva nejbližší body na hranici daného objektu. Další možností je definovat střední osu jako množinu středů všech kruhů  $k$  vepsaných do plochy objektu  $\mathcal{O}$ , pro které platí:

- kruh  $k$  je tečný k  $\mathcal{O}$  ve dvou a více bodech,
- kruh  $k$  neobsahuje žádné další body ležící na hranici  $\mathcal{O}$  (Karimipour, Ghandehari 2013).

Pro konstrukci střední osy objektu, resp. její určité aproximace ve 2D existuje několik metod, přičemž často používaný přístup je založený na využití Thiessenových polygonů (Karimipour, Ghandehari 2013).

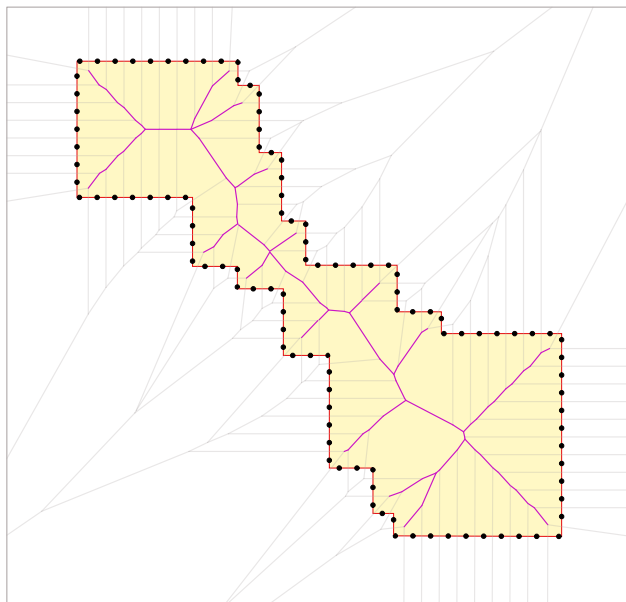
Postup pro získání aproximace střední osy objektu lze jednoduše popsat následujícími kroky:

1. Hranice objektu je navzorkována body s daným rozestupem.
2. Nad vytvořenými body jsou vygenerovány Thiessenovy polygony.
3. Hrany Thiessenových polygonů ležící mimo daný objekt jsou odstraněny.
4. Zbylé hrany Thiessenových polygonů jsou pak aproximací střední osy pro daný objekt.

Na výsledný tvar střední osy má zásadní vliv hustota bodů, kterými je navzorkována hranice objektu, přičemž platí, že s rostoucí hustotou bodů roste míra detailu výsledné aproximace střední osy (Karimipour, Ghandehari 2013).

Karimipour a Ghandehari (2013) dále uvádějí, že ke konstrukci Thiessenových polygonů lze využít jejich vztahu s Delaunayho triangulací. To prakticky znamená nad body vzniklými navzorkováním hranice objektu vypočítat Delaunayho triangulaci, následně odstranit trojúhelníky ležící vně objektu a nad zbylými trojúhelníky sestrojít opsané kružnice. Hrany vymežující Thiessenovy polygony pak vzniknou pospojováním středů kružnic opsaných zbylým trojúhelníkům, přičemž tyto hrany pak přímo odpovídají dané aproximaci střední osy.

Ukázka odvození aproximace průběhu střední osy s využitím Thiessenových polygonů je uvedena na obrázku č. [23](#).



**Obr. 23:** Ukázka odvození střední osy s využitím Thiessenových polygonů.  
Zdroj: vlastní tvorba dle Karimipour, Ghandehari 2013

## 2.5 Vybrané metody pro porovnávání liniiových dat

Tato kapitola je věnována vybraným postupům využívaným pro porovnávání liniiových objektů, resp. k určení míry shody liniiových objektů. Dále uvedené přístupy k uvedené problematice přistupují z různých pohledů. Některé postupy jsou čistě matematické, jiné naopak více aplikačně zaměřené, odlišují se formátem zpracovávaných dat, komplexností a dalšími vlastnostmi.

### 2.5.1 Přístupy založené na výpočtu vzdáleností

První skupinu přístupů k určení míry shody liniiových objektů lze označit jako přístupy geometrické. Tyto přístupy zpravidla vycházejí z principů výpočetní geometrie a jejich základním kritériem jsou vzdálenosti vrcholů analyzovaných linií. Dvěma nejčastěji v odborné literatuře zmiňovanými přístupy jsou *Frechétova* a *Hausdorffova* vzdálenost (Chambers, Wang 2013), které jsou níže stručně charakterizovány.

#### 2.5.1.1 Frechétova vzdálenost

Frechétova vzdálenost je z pohledu výpočetní geometrie jedním z nerozšířenějších a nejvíce studovaných přístupů (Chambers, Wang 2013). Diskrétní Frechétova vzdálenost pracuje s dvojicí orientovaných lomených čar – tedy liniemi tvořenými dílčími segmenty. Obě linie mají pak příslušný počet vrcholů (vždy minimálně dva – počáteční a koncový bod). Prvním krokem je nalezení všech možných dvojic vrcholů, kdy dvojice je vždy tvořena body z obou linií. Je zde stanovena podmínka, že krajní body obou linií musí vždy tvořit dvojice. Dále jsou možné všechny dvojice za podmínky, že nedochází k pohybu zpět. Tímto způsobem vznikne tedy více možností, jak linie projít a dvojice vytvořit. Pro každou možnost se následně spočítají vzdálenosti mezi všemi dvojicemi. Ze všech možných variant – tedy sestav dvojic bodů se vždy vybere maximální hodnota a výsledná Frechétova vzdálenost je pak nejmenší hodnota z těchto maximálních hodnot (Eiter, Mannila 1994).

#### 2.5.1.2 Hausdorffova vzdálenost

Hausdorffova vzdálenost představuje nejčastěji využívanou alternativu Frechétovy vzdálenosti. Postup pracuje s dvěma lomenými čarami, kde každá z nich je tvořena příslušným počtem vrcholů. Vybere se jedna linie, resp. sada jejích vrcholů a pro každý z nich se spočítají vzdálenosti ke všem bodům na druhé linii. Ze všech vypočtených vzdáleností ke všem bodům na druhé linii je vždy uchována ta nejkratší. Poté, co toto provedeme pro všechny body máme pro každý z nich uchovanou vzdálenost k nejbližšímu bodu na druhé linii. Hausdorffova vzdálenost je pak maximum z těchto vzdáleností (Alt, Scharf, 2006).

Hausdorffova vzdálenost je oproti Frechétově vzdálenosti orientovaná a záleží tedy na tom od které ze dvou linií se počítá. Této asymetrie je možné využít například pokud chceme mít při feature matchingu možnost přiřadit k jedné linii více linií z druhé sady dat a naopak (Li, Goodchild 2011).

Li a Goodchild (2011) se ve své práci zabývají aplikací Hausdorffovy vzdálenosti v geoinformatické. Autoři se obecně věnují problematice kombinování prostorových dat z různých zdrojů a uvádějí obecně tři přístupy, jak určovat podobnost. Jedním z nich je geometrický přístup, který řeší vzdálenosti mezi objekty nebo například tvarovou podobnost. Druhým přístupem je podobnost atributová, která zkoumá například podobnost názvů. Třetím přístupem je přístup topologický, kde zkoumá a porovnává vztah daných prvků k okolním objektům.

Autoři následně představují metodu pro určení míry podobnosti mezi liniiovými objekty, která je založena na kombinaci orientované Hausdorffovy vzdálenosti, měření úhlu mezi liniemi a podobnosti názvů. Autoři zde využívají asymetrie Hausdorffovy vzdáleností k tomu, aby bylo možné propojit jeden objekt s více objekty v druhé sadě dat a naopak. Pro měření podobnosti názvu je zde využita Hammingova vzdálenost určující míru shody mezi dvěma slovy/názvy. Obě vzdálenosti jsou spojeny v jednu výslednou vzdálenost mezi liniiovými objekty, která ve výsledku určuje míru shody mezi uvedenými objekty.

### 2.5.2 Ostatní přístupy

Druhá skupina přístupů zahrnuje přístupy založené na jiných principech. Jedná se o topologické přístupy nebo například o metody provádějící výpočet s daty v rastrovém formátu.

Autoři **Chambers a Wang (2013)** předkládají metodu, která vychází z tzv. homotopie. Zjednodušeně lze homotopii popsat jako takovou vlastnost křivky, že je ji spojitou deformací ztotožnit s jinou křivkou. Deformovaná křivka pak určuje svou deformací tzv. plochu homotopie. Na základě vlastností křivek (ve smyslu homotopie a dalších odvozených) je pak prováděno určení míry shody mezi liniemi. Jako významnou výhodu postupu autoři uvádějí možnost metodu aplikovat na libovolném typu povrchu.

**Gong, Li a Zhang (2002)** se na problematiku dívají poněkud odlišně. Zabývají se primárně tvarovou podobností liniiových objektů. Hlavním kritériem jejich metody jsou rozdíly úhlových změn směru dvou linií. Postup vychází z jednoduché myšlenky, že pokud linie mění směr stejně a na stejném místě jako jiná linie, jsou tyto dvě linie tvarově podobné.

**Stanislawski, Buttenfield a Doumbouya (2015)** představují ve své práci postup, u kterého je převážná část výpočtu prováděna s daty převedenými na rastrový formát. Autoři přicházejí s vlastním koeficientem míry shody linií označeným jako CLC (*coefficient of line correspondence*). Metoda zahrnuje převod obou datasetů linií na dva rastry, které představují hustotu linií. Tyto rastry jsou následně od sebe odečteny. Dále je myšlenka taková, že odpovídající si linie budou ležet v místech, kde rozdíl obou rastrů není statisticky významně odlišný od nuly. Výsledná hodnota CLC koeficientu je pak rovna podílu součtu délek odpovídajících si linií v obou datasetech a součtu délek téhož spolu s délkou zbylých linií v obou datasetech. Výhoda tohoto přístupu je, že koeficient míry shody lze spočítat jak globálně pro celé území, tak i lokálně. Pro lokální výpočet je území rozděleno pravidelnou mřížkou na dílčí oblasti, v nichž je výpočet proveden zvlášť a lze tak získat představu o prostorovém rozmístění míry shody.

Trojice autorů **Nedas, Egenhofer a Wilmsen (2007)** publikovali topologický přístup založený na tzv. *Nine intersection model* publikovaný Egenhoferem a Herringem v roce 1990. Tento přístup řeší vzájemné vztahy dvou linií. Každý objekt sestává ze 3 částí – vnitřní část,

hraniční body, vnější část a vztah dvou linií lze popsat maticí, která popisuje, co je průnikem jednotlivých částí oněch zkoumaných linií. Kombinacemi je možné získat 512 možných vztahů, přičemž 33 z toho je reálně možných a použitelných v prostoru  $\mathbb{R}^2$ . Na tuto část pak autoři navazují částí zabývající se určením míry blízkosti dvou linií. Blízkost, resp. podobnost je řešena ze tří různých pohledů. Prvním z nich je vztah mezi hraničními body linií (tedy vzdálenosti koncových bodů). Druhý zkoumá vzdálenost vnitřní části linie a hraničních bodů druhé linie a třetí popisuje vzdálenost vnitřků obou linií.

## 3 Praktická část

### 3.1 Použitá data

Cílem práce je provést porovnání dvou datových sad obsahujících čáry terénní kostry, čemuž odpovídají využitá data, které lze rozdělit do dvou částí. První část tvoří jednu ze sad ČTK a jedná se o vektorovou reprezentaci tří typů ČTK – hřbetnic, údolnic, lomových hran, která vznikla v rámci autorovy bakalářské práce (Kyncl 2020). Ke vzniku této datové sady byla využita data kartografických reprezentací, konkrétně geometrie horních a dolních linií, která jsou součástí interní databáze ZÚ Data10. Tato data, která nejsou standardně dostupná, byla k použití v rámci práce poskytnuta Zeměměřickým úřadem.

Ke vzniku druhé datové sady ČTK (která vznikla v rámci této práce) byl využit digitální model terénu, konkrétně pak DMR 5G. Ten je volně dostupný prostřednictvím síťové prohlížecké služby ESRI ArcGIS Server, která je poskytována Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK).

Tato druhá datová sada je v rámci práce označována jako referenční, resp. je pro účely práce považována za reprezentaci „reality“. Oproti datům odvozeným z kartografických reprezentací (které vznikly překreslováním obsahu starších analogových map) se určitě jedná o objektivnější způsob určení průběhu ČTK. Z tohoto důvodu je tato datová sada v některých částech práce označována jako reprezentace „reality“, přičemž se však samozřejmě nejedná o realitu v pravém slova smyslu.

Navíc byly využity polygony odpovídající plochám skalních útvarů na území Česka, která pocházejí stejně jako data o kartografických reprezentacích z interní databáze ZÚ Data10.

#### 3.1.1 Popis dat

Níže bude popsány základní vlastnosti využitých dat.

##### 3.1.1.1 ČTK z kartografických reprezentací a polygony skalních útvarů

Vektorová reprezentace průběhu tří typů čar terénní kostry odvozená z dat kartografických reprezentací vznikla v rámci autorovy bakalářské práce (Kyncl 2020). Proces vzniku této datové sady je detailněji popsán v kapitole [2.2](#). Jednotlivé typy hran jsou reprezentovány

vrstvou vektorových linií.

Polygony reprezentující půdorys skalních útvarů byly taktéž převzaty z autorovy bakalářské práce. Jedná se o polygony, v nichž se nachází určitá kartografická kresba skal. Vrstva polygonů původně pochází z dat kartografických reprezentací (ZÚ Data10).

Tabulka č. 1 zachycuje počty jednotlivých objektů.

typ objektu	počet objektů
polygony	39 851
hřbetnice	1 394
údolnice	187
lomové hrany	22 422

**Tab. 1:** Počty jednotlivých objektů – použitá data.

### 3.1.1.2 DMR 5G

DMR 5G představuje reprezentaci zemského povrchu v digitální podobě. Model byl dokončen v roce 2016 a vznikl na základě dat pořízených metodou leteckého laserového skenování. Úplná střední chyba výšky modelu je 0,18 m v odkrytém terénu, v zalesněném terénu je pak tato hodnota 0,3 m (ČÚZK 2022).

Na území Česka je volně dostupný přes síťovou prohlížečskou službu ArcGIS Server. Touto formou je model distribuován ve formě pravidelného rastru, jehož prostorové rozlišení je 2 m. V rámci práce se nepracuje s kompletním modelem pro celé území Česka, ale jen s výřezem kolem polygonů skalních útvarů.

Terén je v oblasti skalních útvarů velmi výškově členitý a obsahuje řadu specifických útvarů (strmé stěny, převisy, ...), což je třeba zohlednit při tvorbě digitálního modelu terénu na základě dat leteckého laserového skenování.

Jedním ze zásadních problémů je hustá vegetace v oblasti skal, často tvořena jehličnatými stromy (tzn. nepomůže sběr dat mimo vegetační sezónu). Nad vegetací vyčnívá pouze část skalních věží a zbytek zůstává zakryt. To komplikuje interpretaci získaných dat, tedy jestli se například paprsek vyslaný skenerem odrazil od terénu nebo třeba od větví stromů. K eliminaci těchto problémů je třeba pořizovat data tak, aby vzniklo hustší bodové mračno, k čemuž je třeba upravit výšku, z níž jsou data pořizována (Lysák 2016a).

Dalším zdrojem komplikací jsou stíny, případně pak vzniklé oblasti bez dat. Vznik těchto situací je zapříčiněn specifickou vzájemnou polohou vyššího objektu a skeneru. Ze zastíněné oblasti za vyšším objektem pak nejsou získána data. Tento problém nenastává, pokud je skener přímo nad daným objektem, ale projevuje se výrazně na krajích zorného pole skeneru. Možným řešením je volba menších rozestupů mezi letovými řadami, čímž se docílí toho, že větší oblast bude skenování provedeno s menším pohledovým úhlem (Lysák 2016a).

Rovněž je problematické pořizování dat v úzkých, hlubokých roklích s vegetací. Pokud se z těchto oblastí podaří získat nějaká data, tak nastává problém při vizuální kontrole a nelze v některých případech snadno rozeznat, jestli nejnižší body náleží terénu nebo vegetaci (Lysák 2016a).

### 3.2 Detekce čar terénní kostry s využitím digitálního modelu terénu

V této části je představen způsob, jakým byla získána referenční sada čar terénní kostry. Základem pro detekci čar terénní kostry je zde využití digitálního modelu terénu – konkrétně digitálního modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G). Digitální model reliéfu 5. generace představuje v současnosti nejaktuálnější a nejpřesnější reprezentaci reálného průběhu terénu na celém území Česka, a tedy čáry terénní kostry získané na jeho základě jsou v rámci práce považovány za nejlépe odpovídající realitě (ČÚZK 2022).

Metod pro detekci čar terénní kostry z digitálního modelu terénu existuje celá řada, přičemž jejich určitý výčet nabízí kapitola [2.3](#). Pro účely této práce byla zvolena metoda publikovaná Jarošem (2011), která je založena na konstrukci a analýze příčných profilů nad digitálním modelem terénu. Tato metoda byla vybrána na základě velmi dobrých výsledků na testovacích datech a také z důvodu, že je k ní (narozdíl od ostatních metod) dispozici velmi detailní dokumentace včetně zdrojových kódů v jazyce `Matlab`. Dostupnost zdrojových kódů byla velmi významným faktorem pro volbu této metody, jelikož se předem očekávalo, že bude třeba metodu pro takto specifická data určitým způsobem modifikovat, což dostupnost původních zdrojových kódů výrazně usnadní. Detailní popis této metody je uveden v kapitole [2.3.2](#), tato část je zaměřena na popis její reimplementace se všemi provedenými modifikacemi pro použitá data.

V následujících částech bude postupně popsán způsob detekce 3 typů čar terénní kostry – hřbetnic, údolnic a lomových hran. Celý postup zahrnuje následující dílčí kroky:

1. Příprava vstupních dat – získání DMR 5G v okolí skalních útvarů.
2. Zpracování digitálního modelu – dekompozice na jednotlivé příčné profily.
3. První fáze zpracování příčných profilů – generalizace.
4. Druhá fáze zpracování příčných profilů – detekce jednotlivých typů lomových bodů čar terénní kostry.
5. Tvorba a zpracování výstupů.

Protože výpočet probíhá po jednotlivých polygonech skalních útvarů, dále bude popsán postup aplikovaný na každý polygon.

### 3.2.1 Příprava vstupních dat – DMR 5G v okolí skalních útvarů

Digitální model reliéfu 5. generace je pro území Česka volně k dispozici jako síťová prohlížečská služba ESRI ArcGIS Server, kterou poskytuje Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK). Takto distribuovaný model je ve formě rastru s prostorovým rozlišením 2 m. Pro účely této práce není třeba pracovat s modelem pro celé území Česka, avšak stačí vždy výřez modelu v blízkém okolí daného skalního útvaru.

Pro každý polygon reprezentující skalní útvar je tedy na základě jeho polohy pořízen výřez DMR 5G v jeho blízkém okolí, který je uložen k dalšímu zpracování v podobě rastru s velikostí pixelu 2 m. Polohu každého polygonu skalního útvaru lze popsat pomocí jeho ohraničujícího obdélníku (resp. *extent*), přičemž blízké okolí je pak zvoleno jako příslušný ohraničující obdélník polygonu zvětšený ve všech směrech o 5 metrů. Rozšíření o část terénu mimo plochu polygonu je provedeno hlavně z toho důvodu, že lze očekávat, že některé polygony mohou být zatíženy určitou polohovou chybou. Pokud tato případná polohová chyba není nijak extrémní, tak má stále smysl se polygonem zabývat a případná odvozená terénní hrana může být relevantní.

### 3.2.2 Zpracování digitálního modelu – dekompozice na příčné profily

Dalším krokem postupu po získání modelu terénu v okolí příslušného skalního je příprava mechanismů pro dekompozici modelu na jednotlivé příčné profily. V těchto profilech se následně budou hledat lomové body ČTK. Cílem je získat příčné profily ve 4 směrech:

- ve směru řádků rastru (horizontální),
- ve směru sloupců rastru (vertikální),
- ve směru diagonál rastru ve smyslu levý horní roh → pravý dolní roh,
- ve směru diagonál rastru ve smyslu levý dolní roh → pravý horní roh.

Čtyři různé směry, ve kterých bude prováděna detekce bodů terénních hran, jsou využity z toho důvodu, aby se co nejvíce zvýšila šance, že budou nalezeny všechny terénní hrany bez ohledu na jejich směr a orientaci. Pokud by byly využity například pouze 2 směry – horizontální a vertikální, tak by terénní hrany v jiných, než těchto směrech nemusely být nalezeny.

Rastr digitálního modelu je zpracováván ve formě 2D pole a k hodnotě v příslušném místě lze přistupovat pomocí dvojice souřadnic – *číslo řádku*, *číslo sloupce*. Jelikož je rastr DMR vždy pravidelný a má obdélníkový tvar, tak získat příčné profily ve směru řádků nebo sloupců je velmi jednoduché. Pro získání příčného profilu ve směru řádku, pro *m*-tý řádek, je souřadnice *číslo řádku* konstantní a rovna *m* a přes hodnotu souřadnice *číslo sloupce* se iteruje od 0 do hodnoty odpovídající počtu sloupců. Příčný profil ve směru sloupce, pro *n*-tý sloupec, je získán analogicky – přes souřadnici *číslo řádku* se iteruje od hodnoty 0 do hodnoty odpovídající počtu řádků a souřadnice *číslo sloupce* je konstantní a rovna *n*. Pro analýzu profilu s účelem detekce lomových bodů terénních hran je třeba, aby každý profil byl tvořen minimálně třemi

body. Tato podmínka by však v případě řádkových a sloupcových profilů měla být splněna vždy díky práci s větším okolím skalního útvaru. Výsledný řádkový profil je ve formě seznamu dvojic hodnot (*číslo sloupce, hodnota*), u sloupcového profilu je pak forma výstupu obdobná – (*číslo řádku, hodnota*).

Vytvoření diagonálních profilů je mírně složitější. Jak již bylo uvedeno výše – pro další analýzu profilů je třeba, aby příčný profil obsahoval vždy minimálně tři body. V případě diagonálních profilů tato podmínka není splněna vždy na krajích, resp. v rozích rastru. V těchto místech by teoreticky vznikaly profily o délce jednoho a dvou bodů, které by nebylo možné dále analyzovat, a tak jsou tyto části rastru vynechány a profily se vytváří až od požadované délky. Co se týče samotné konstrukce profilu, tak je třeba od počátečního bodu měnit současně hodnoty obou souřadnic (*číslo řádku, číslo sloupce*), a to vždy tak dlouho, než se narazí na okraj rastru. Poté se posouvá počáteční bod a proces se opakuje pro další profil. Profily v diagonálním směru jsou ukládány ve dvou variantách. Jednak ve formě trojic hodnot – (*číslo řádku, číslo sloupce, hodnota*), aby bylo pak jednoduše možné dohledat příslušné místo v původním rastru. Zároveň také ve formě (*index, hodnota*). Index v tomto případě odpovídá pořadí bodu v rámci profilu (s počáteční hodnotou 0). V této podobě je profil vstupem dalších procesů, přičemž pořadí bodů v obou profilech je stejné a lze tak jednoduše pomocí indexu dohledat konkrétní souřadnice bodu.

Výše byl naznačen postup dekompozice výřezu DMR 5G na jednotlivé příčné profily. Veškerý další postup spočívá v postupném procházení a analýze jednotlivých profilů vytvořených v jednotlivých směrech s cílem nalézt v nich lomové body tří uvedených typů terénních hran.

### 3.2.3 První fáze zpracování příčných profilů – generalizace

Posledním krokem před samotnou analýzou profilů s cílem detekce tří typů čar terénní kostry je generalizace příčných profilů. Generalizace tvoří důležitou část metody detekce čar terénní kostry a jejím hlavním smyslem je eliminace méně významných terénních tvarů, které nejsou pro celkový charakter terénu významné. Proces generalizace profilů nabývá na významu z toho důvodu, že analýza terénu je prováděna v okolí skalních útvarů, což jsou místa, kde lze očekávat velké množství různých terénních tvarů, ze kterých je nutné vybrat ty nejvýznamnější.

Ke generalizaci příčných profilů je využit Douglas–Peuckerův algoritmus (viz kapitola [2.3.2](#)). Pro každý příčný profil jsou zjištěny souřadnice jeho krajních bodů, z nichž jsou určeny parametry obecné rovnice přímky, která tyto dva krajní body spojuje. V dalším kroku je třeba vypočítat kolmou vzdálenost všech mezilehlých bodů od této úsečky. Určení vzdálenosti se provádí v cyklu přes všechny mezilehlé body, přičemž na základě každého mezilehlého bodu a původní přímky jsou určeny parametry obecné rovnice přímky, která je kolmá na přímkou původní a zároveň prochází mezilehlým bodem. Následně je nalezen průsečík těchto dvou přímek a je vypočtena vzdálenost od průsečíku k danému mezilehlému bodu. Tímto způsobem je nalezen bod, jehož kolmá vzdálenost od původní přímky je největší a zároveň větší než zvolená mezní hodnota a v tomto bodě je původní úsečka rozdělena na dvě části. Postup je následně rekurzivně opakován nad oběma částmi, přičemž je ukončen, pokud již mezi krajními body neexistuje žádný protilehlý nebo pokud je vzdálenost všech mezilehlých bodů od dané úsečky menší než stanovená mezní hodnota.

V případě generalizace příčných profilů vzniknuvších dekompozicí rastru DMR 5G je třeba základní algoritmus drobně poupravit. Vstupní příčný profil je vždy ve formě seznamu dvojic hodnot (*index, hodnota*). V případě profilů vzniklých ve směru řádků a sloupců odpovídá index vzdálenosti daného pixelu od počátku. V případě diagonálních profilů tomu tak není a index slouží k dohledání příslušného bodu v pomocném profilu obsahujícím kompletní souřadnice daného pixelu, ale pro účely další analýzy jej lze taktéž chápat jako vzdálenost od počátku.

Daný příčný profil lze tedy zpracovávat jako souřadnice bodů v rovině popsány dvojicí souřadnic – vzdálenost od počátku, nadmořská výška. V první fázi jsou pomocí Douglas-Peuckerova algoritmu se zvolenou minimální kolmou vzdáleností nalezeny významné body, které v profilu zůstanou zachovány. Výstupem této první fáze je seznam indexů, které odpovídají příslušným bodům v profilu. V druhé fázi je vytvořen nový profil, do něhož jsou prostřednictvím indexů přidány nalezené významné body z původního profilu a krajní body původního profilu. Tyto body zůstanou i v generalizovaném profilu zachovány beze změny. Následně jsou do nového profilu přidány zbylé mezilehlé body, přičemž hodnota jejich nadmořské výšky je vypočtena pomocí lineární interpolace mezi zachovanými body. Výsledkem je tedy nový profil, který obsahuje stejné množství bodů jako profil původní, avšak hodnoty nadmořské výšky jsou zachovány pouze u významných bodů.

Pro generalizaci příčných profilů bylo nutné zvolit minimální kolmou vzdálenost, která je základním parametrem Douglas–Peuckerova algoritmu a ovlivňuje výslednou míru generalizace. Na základě testování nad reálnými polygony reprezentující skalní útvary byla tato hodnota zvolena na 1 m. Výše popsaným postupem byla tedy provedena předpříprava všech příčných profilů před hlavní částí celého procesu – detekcí jednotlivých typů čar terénní kostry.

### 3.2.4 Detekce jednotlivých typů čar terénní kostry

Tato část se bude zabývat již samotným postupem detekce jednotlivých typů čar terénní kostry. Cílem je představit způsob pro detekci tří typů čar terénní kostry, kterými jsou:

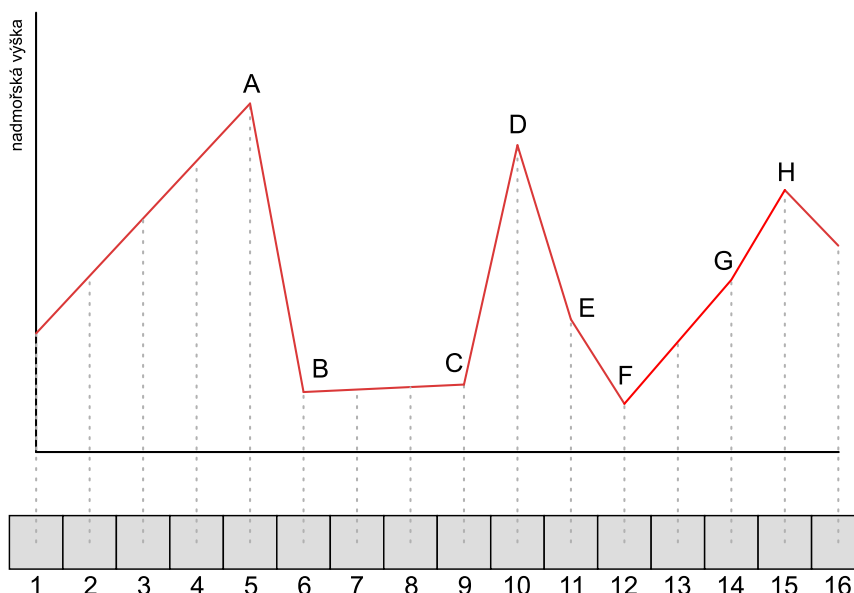
- hřbetnice,
- údolnice,
- lomové hrany.

Základem postupu je postupné procházení generalizovaných příčných profilů vzniklých dekompozicí daného výřezu modelu terénu. Každý příčný profil je analyzován postupně po třech sousedních pixelech (bodech profilu), přičemž prostřední pixel je vždy vyhodnocován na základě nadmořské výšky sousedních pixelů, resp. sklonu svahu mezi pixely (například na obrázku č. 24 – pro vyhodnocení pixelu číslo 5 se zkoumají pixely č. 4 a 6). Základním kritériem pro určení toho, jaký typ lomového bodu terénní hrany pixel reprezentuje, je dvojice sklonů – sklon svahu mezi předchozím a aktuálním pixelem a sklon svahu mezi pixelem aktuálním a následujícím. Pro výpočet sklonu je kromě nadmořských výšek jednotlivých bodů využita informace o prostorovém rozlišení původního rastru DMR 5G – 2 metry. Výpočet uvedených dvou sklonů je proveden následovně

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{h_2 - h_1}{r}\right); \quad \varphi_2 = \arctan\left(\frac{h_3 - h_2}{r}\right),$$

kde  $\varphi_1$  je sklon svahu mezi předchozím a aktuálním pixelem,  $\varphi_2$  je sklon svahu mezi aktuálním pixelem a následujícím pixelem. Nadmořské výšky předchozího, aktuálního a následujícího pixelu odpovídají v tomto pořadí značení  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ . Proměnná  $r$  reprezentuje rozlišení.

Pro uvedené tři typy terénních hran mají tyto sklony specifické vlastnosti. Aby byl daný pixel vyhodnocen jako část hřbetnice, tak základním předpokladem je, že sklon svahu před analyzovaným pixelem je kladný (stoupající svah) a sklon za analyzovaným pixelem záporný (klesající svah). Tomuto předpokladu odpovídají na modelovém profilu – obr. č. 24 situace A, D, H.



**Obr. 24:** Modelový profil s vyznačenými terénními hranami.

Pro pixel, který tvoří část údolnice, bude platit opak – sklon svahu před analyzovaným pixelem bude záporný (klesající svah) a sklon svahu za analyzovaným pixelem bude kladný (stoupající svah). Tomuto předpokladu odpovídá na modelovém profilu situace F.

Jak je zřejmé z modelového profilu, uvedené předpoklady nejsou úplně postačující – například situace B by teoreticky splňovala podmínky pro to, aby byl daný pixel označen jako část údolnice – svah před klesající (záporný sklon), svah za stoupající (kladný sklon). Ačkoliv je tedy splněna základní podmínka, tak i z pohledu na profil je zřejmé, že se o typickou údolnici nejedná, jelikož jeden ze svahů tvoří téměř rovina. Tyto pixely, kde jeden ze svahů je téměř rovina a druhý naopak rovinou není spadají do třetí kategorie – lomové hrany. Pro definici lomové hrany bude pak důležité zvolit dvě mezní hodnoty – maximální sklon, kdy je ještě svah považován za rovinu a minimální sklon, který musí mít strmější ze svahů tvořící lomovou hranu (například – pixel bude vyhodnocen jako lomová hrana, pokud jeden ze svahů bude mít

v absolutní hodnotě menší sklon než  $5^\circ$  – rovina a druhý svah bude mít sklon alespoň  $20^\circ$ ). Jako součásti lomových hran by byly vyhodnoceny situace B a C na obr. č. 24

Na základě uvedeného je třeba poupravit původní předpoklad pro hřbetnici a údolnici. Nebude stačit pouze, aby daný sklon byl kladný nebo záporný, avšak bude muset být větší, resp. menší než stanovená mezní hodnota sklonu. Tato mezní hodnota sklonu odpovídá maximálnímu, resp. minimálnímu sklonu, který svah může mít, aby byl ještě označen jako rovina. Tato hodnota bude dále označena jako *mezní sklon roviny*. Hodnota tohoto parametru byla zvolena jako  $5^\circ$ , přičemž volba hodnoty vychází z testování nad reálnými profily v rámci skalních útvarů a zároveň odpovídá intuitivní představě o sklonu roviny.

Zbylé situace, které nesplňují žádnou z uvedených podmínek, jsou považovány za součásti svahů nebo rovin (situace E, G) a nespádají tak do žádné z výše popsanych kategorií.

### 3.2.4.1 Proces detekce čar terénní kostry

Výše byla naznačena hlavní myšlenka detekce jednotlivých typů čar terénní kostry v příčných profilech. Pro identifikaci daného typu terénní hrany je analyzována trojice sousedních pixelů, přičemž prostřední pixel je vyhodnocován na základě hodnoty sklonu svahu mezi ním a okolními dvěma pixely. Na základě hodnot sklonů je daný pixel zařazen do jedné ze čtyř kategorií:

1. bod hřbetnice,
2. bod údolnice,
3. bod lomové hrany,
4. ostatní body – součásti svahů, rovin, ...

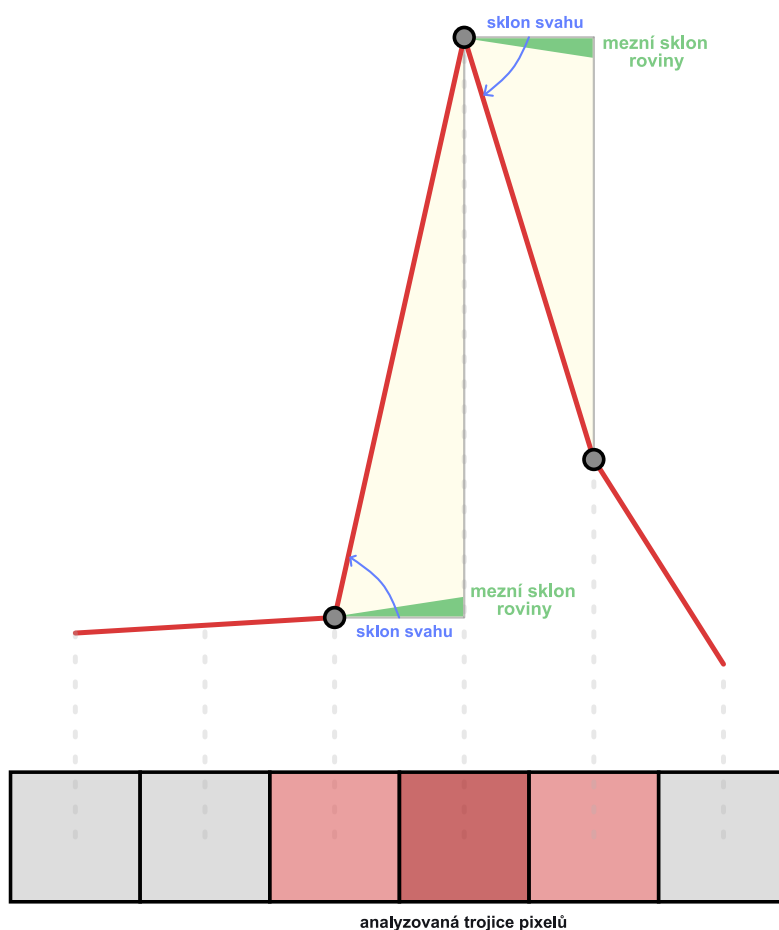
Uvedené rozdělení představuje v rámci procesu detekce hran první krok, který však sám o sobě není dostačující. Je zřejmé, že všechny nalezené terénní hrany daného typu, které splní danou podmínku, nebudou stejné, resp. stejně významné. Významnost jednotlivých hran je dána řadou vlastností (například převýšení, délka svahů, sklon svahů, ...), přičemž určitá kvantifikace významnosti terénních hran bude klíčová pro nalezení těch nejvýznamnějších tvarů, které největší měrou ovlivňují a reprezentují průběh terénu v rámci daného skalního útvaru a nejvíce se tak projeví na jeho kartografické reprezentaci. Tato úvaha vychází z předpokladu, že terén bude v rámci většiny skalních útvarů poměrně členitý a i přes generalizaci příčných profilů zde zůstane větší množství méně významných terénních hran, které by charakteristiku skalního útvaru spíše zkreslily. Druhým významným argumentem pro zavedení určitého způsobu kvantifikace významnosti terénních hran je následná možnost lokální adaptace. Pokud se určitým způsobem provede kvantifikace významnosti daného bodu z hlediska jeho významnosti pro daný typ terénní hrany, bude následně možné z každého polygonu skalního útvaru vybrat například určitý podíl nejvyšších hodnot.

### 3.2.4.2 Detekce hřbetnic

Při procházení příčného profilu a jeho analýze pro trojicích pixelů musí pro pixel náležící hřbetnici platit následující:

- Sklon svahu před analyzovaným pixelem (tzn. sklon mezi předchozím pixelem a pixelem aktuálním) musí být kladný (stoupající svah) a zároveň větší než mezní sklon roviny – tedy  $5^\circ$  (maximální přípustný úhel, aby byl svah považován za rovinu).
- Sklon svahu za analyzovaným pixelem musí být záporný (klesající svah) a zároveň v absolutní hodnotě větší než mezní sklon roviny.

Ukázková detekce pixelu hřbetnice s vyznačenými parametry je uvedena na obrázku č. 25.



**Obr. 25:** Detekce hřbetnic – základní parametry.

Pokud daný pixel splňuje obě uvedené podmínky zároveň, tak přechází do další fáze, kdy je kvantifikována míra významnosti dané terénní hrany. Významnost hřbetnice může být určena různými parametry.

Určitý vliv může mít strmost svahů a lze předpokládat, že čím strmější (sklonitější) oba svahy budou, tím bude hřbetnice výraznějším terénním prvkem. Dalším parametrem je převýšení svahů, kdy větší převýšení by mělo znamenat významnější hřbetnici. Dalším možným parametrem je délka svahů, která taktéž ovlivňuje významnost terénní hrany. Pro kvantifikaci významnosti byly zvoleny dva poslední zmíněné parametry – *převýšení svahů*, *délka svahů*. Na základě kombinací těchto dvou parametrů je sestaven koeficient charakterizující míru významnosti dané hřbetnice.

Před uvedením konkrétního vztahu pro výpočet daného koeficientu je třeba naznačit jakým způsobem získat pro daný bod požadované hodnoty parametrů. Pro nalezený pixel, který dle základní podmínky náleží hřbetnici je třeba získat dvě dvojice parametrů:

- převýšení pravého a levého svahu,
- délka pravého a levého svahu.

Aby bylo možné hodnoty parametrů určit, je třeba vždy nalézt oba celé svahy, resp. jejich konce/počátky. Koncem/počátkem svahu v rámci této analýzy rozumíme bod (pixel), ve kterém se nachází bod reprezentující jinou terénní hranu (hřbetnici, údolnici, lomovou hranu), tedy bod, kde dochází k výrazné změně sklonu. Na modelovém profilu na obrázku č. 26 jsou detekovány tři hřbetnice (označeny A, D, H), příslušné svahy jsou vyznačeny odlišnými barvami (levý svah zeleně, pravý svah modře). Pro první hřbetnici (A) je počátek levého svahu na kraji profilu a pravý svah končí v místě lomové hrany (B). U druhé hřbetnice (D) je počátek levého svahu v místě lomové hrany (C) a pravý svah končí v místě údolnice (F). Pro poslední hřbetnici (H) je počátkem levého svahu údolnice (F) a konec pravého svahu je v místě konce profilu.

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud je v rámci analýzy profilu detekována hřbetnice, je třeba nalézt krajní body obou k ní příslušných svahů.

Nalezení počátku levého je poměrně snadné a zahrnuje následující kroky.

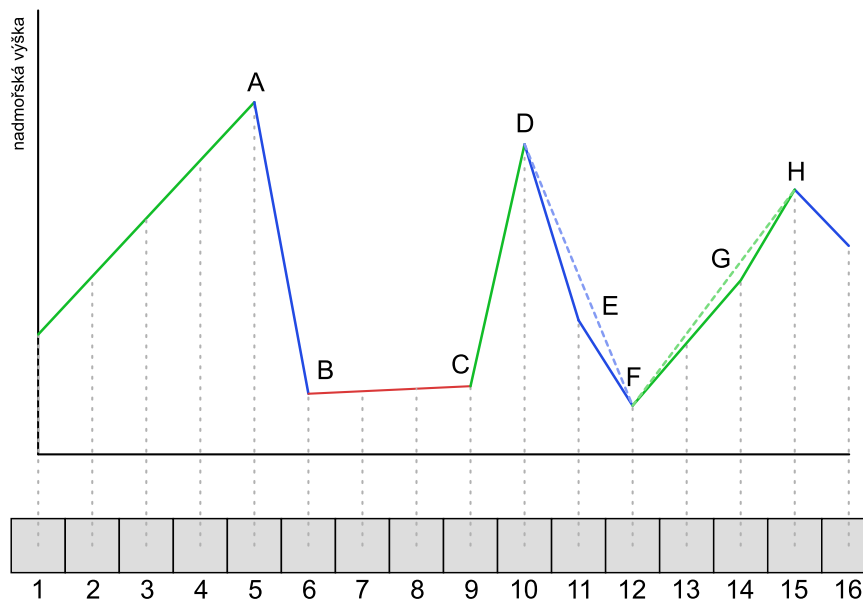
- Na začátku procházení profilu je jako počátek levého svahu stanoven počáteční bod profilu.
- Profil je následně procházen po pixelech.
- Pokud je nalezen pixel odpovídající údolnici nebo lomové hraně, tak je jako nový počáteční bod levého svahu označen právě tento pixel.
- Pokud je nalezený pixel bodem hřbetnice, tak jsou nejprve spočítány parametry levého svahu (s počátkem v počátku profilu) a až poté je daný pixel označen jako nový počátek levého svahu.

Toto zjednodušeně znamená, že počátek levého svahu se při procházení profilu postupně posouvá s každou nalezenou terénní hranou.

V případě konce pravého svahu je postup drobně odlišný. Hledání konce pravého svahu se provádí právě tehdy, když je při průchodu profilu nalezen bod odpovídající hřbetnici. Postup pak sestává z těchto kroků.

- Nalezení pixelu odpovídajícího bodu hřbetnice.
- Procházení části profilu napravo od nalezeného pixelu.
- Procházení pravé části profilu je ukončeno, pokud je v profilu nalezen bod odpovídající terénní hraně. Tento bod je pak označen jako konec pravého svahu a mohou být vypočteny parametry pravého svahu.
- Pokud nastane situace, kdy není v pravé části profilu nalezena žádná terénní hrana, tak je jako konec pravého svahu označen pixel na konci profilu.

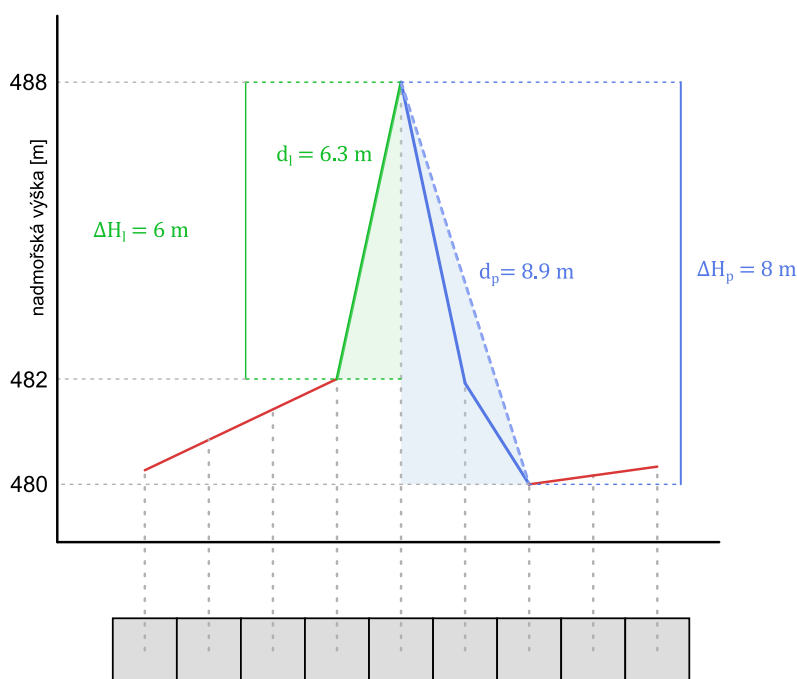
Pro zjednodušení výpočtu jsou následně parametry svahů počítány jen na základě nadmořských výšek těchto krajních bodů – počátek levého svahu, bod hřbetnice, konec pravého svahu. Jelikož je profil generalizovaný, tak toto drobné zjednodušení nemá téměř žádný vliv na hodnoty parametrů. Uvedené zjednodušení je znázorněno na obr. č. 26 v případě hřbetnice D (pravý svah) a hřbetnice H (levý svah).



**Obr. 26:** Modelový profil s vyznačenými terénními hranami včetně jednotlivých svahů u detekovaných hřbetnic.

V případě modelového profilu na obrázku č. 26 by postup byl následující. Na počátku je jako počátek levého svahu stanoven pixel č. 1. Pixel č. 5 je následně vyhodnocen jako hřbetnice (A), přičemž počátek levého svahu je stále pixel č. 1. Konec pravého svahu je nalezen na dalším pixelu (6), kde je detekována lomová hrana. V tuto chvíli mohou být určeny parametry obou svahů. Následně je pixel č. 5 označen jako nový počátek levého svahu a postup pokračuje dále. Na pixelu č. 6 je detekována lomová hrana a tento pixel je tedy označen jako nový počátek levého svahu. Na pixelu č. 9 je nalezena další lomová hrana a pixel se tak stává novým počátkem levého svahu. Na pixelu č. 10 je detekována hřbetnice, přičemž počátek levého svahu je znám – pixel č. 9. Následuje procházení pravé části profilu, přičemž na pixelu č. 12 je nalezena údolnice a pixel je tak označen jako konec pravého svahu. Potom je možné určit parametry obou svahů a pokračovat v procházení profilu. Na pixelu č. 12 je nalezena údolnice a pixel je označen jako nový počátek levého svahu. Na pixelu č. 15 je nalezena hřbetnice. Počátek levého svahu je onen pixel č. 12. Dále je procházena pravá část profilu, přičemž zde není nalezena žádná terénní hrana a jako koncový bod pravého svahu je označen krajní pixel profilu (16). V tuto chvíli mohou být vypočteny parametry obou svahů.

Nyní je zřejmé, jakým způsobem jsou pro daný pixel označený jako část hřbetnice určeny potřebné parametry. Tyto parametry označíme následujícím způsobem: převýšení levého svahu –  $\Delta H_l$ , převýšení pravého svahu –  $\Delta H_p$ , délka levého svahu –  $d_l$ , délka pravého svahu –  $d_p$ . Délka svahů je chápána jako šikmá délka (viz 26). Uvedené parametry jsou vyznačeny na obrázku č. 27.



Obr. 27: Detekovaná hřbetnice s vyznačenými parametry pro určení významnosti.

Koeficient pro určení významnosti hřbetnic ( $Hrb_v$ ) je pak dán vztahem

$$Hrb_v = \frac{\frac{|\Delta H_l| + |\Delta H_p|}{2}}{\frac{d_l}{\Delta H_l} + \frac{d_p}{\Delta H_p}}$$

V čitateli vztahu je průměrná hodnota převýšení obou svahů. S vyšším převýšením poroste hodnota čitatele. V případě symetrické hřbetnice s velkým převýšením bude hodnota velmi podobná oběma převýšením a bude vysoká. V případě nesymetrické hřbetnice bude využitím průměru hodnota menší a tím by nemělo docházet k situacím, kdy symetrická hřbetnice s nižším převýšením bude mít nižší hodnotu koeficientu než velmi nesymetrická hřbetnice s jedním svahem s velkým převýšením. Ve jmenovateli jsou dva poměry – vždy poměr délky svahu a jeho převýšení. Tento poměr v sobě nese informaci o strmosti hřbetnice – čím bude daný svah strmější, tím budou obě hodnoty podobnější a poměr menší, což povede k vyšší hodnotě koeficientu. Nejvyšších hodnot obecně dosáhnou hřbetnice, které budou symetrické, s velkým převýšením a se strmými svahy, což odpovídá základní představě o významnosti dané terénní hrany.

Pro modelovou hřbetnici na obrázku č. 27 by hodnota koeficientu byla

$$Hrb_v = \frac{\frac{6+8}{2}}{\frac{6.3}{6} + \frac{8.9}{8}} = 3.2$$

V tuto chvíli je tedy zřejmé, jakým způsobem je hodnocena – kvantifikována významnost hřbetnic na základě analýzy příčných profilů. Hodnota koeficientu je vypočtena pro každý pixel splňující základní podmínku, aby mohl být označen jako část hřbetnice. Rastr digitálního modelu terénu v okolí daného skalního útvaru je zpracováván ve 4 fázích, které odpovídají čtyřem směrům, podle nichž je rastr dekomponován na příčné profily – ve směru řádků, sloupců a dvou diagonál. V rámci každé fáze je vytvořen prázdný rastr pro zápis hodnot koeficientu popisujícího významnost hřbetnice, přičemž parametry rastru jsou odvozeny od rastru DMR (prostorové rozlišení, umístění). V každé fázi tak vznikne rastr s hodnotami koeficientů a po analýze DMR ve všech čtyřech směrech jsou hodnoty z těchto rastrů sečteny. Výsledkem této části analýzy je tedy jeden rastr nesoucí ve svých nenulových hodnotách informaci o přítomnosti hřbetnice a o významnosti daného bodu hřbetnice v okolí daného skalního útvaru.

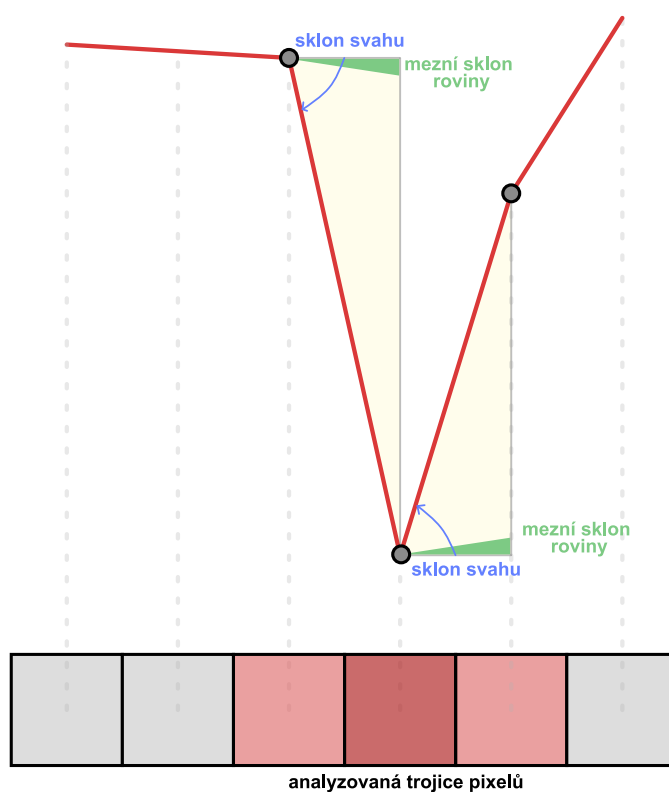
### 3.2.4.3 Detekce údolnic

Dalším typem terénní hrany, kterou je třeba detekovat je údolnice. Postup pro detekci a následně kvantifikaci míry významnosti dané údolnice je analogický k postupu pro detekci hřbetnic. V této části budou tedy popsány pouze odlišnosti mezi postupy.

Pokud analyzujeme příčný profil po trojicích pixelů, tak aby byl daný pixel vyhodnocen jako bod údolnice, musí splňovat následující podmínky:

- Sklon svahu před analyzovaným pixelem (tzn. sklon mezi předchozím pixelem a pixelem aktuálním) musí být záporný (klesající svah) a zároveň v absolutní hodnotě větší než mezní sklon roviny – tedy  $5^\circ$  (maximální přípustný úhel, aby byl svah považován za rovinu).
- Sklon svahu za analyzovaným pixelem musí být kladný (stoupající svah) a zároveň větší než mezní sklon roviny.

Detekce ukázkové údolnice se znázorněnými parametry je uvedena na obrázku č. 28.



Obr. 28: Detekce údolnice – základní parametry.

Stejně, jako v případě detekce hřbetnic, pokud pixel splňuje danou podmínku pro to být údolnicí, tak přechází do další fáze, kde probíhá určení míry významnosti dané hrany. Vztah

pro určení významnosti využívá totožné parametry, jako v případě hřbetnic, přičemž samotný vztah se oproti koeficientu  $Hrb_v$  liší pouze znamínkem. Vztah pro výpočet koeficientu míry významnosti  $Udol_v$  je pak

$$Udol_v = -\frac{\frac{|\Delta H_l| + |\Delta H_p|}{2}}{\frac{d_l}{\Delta H_l} + \frac{d_p}{\Delta H_p}},$$

kde  $\Delta H_l$  – převýšení levého svahu,  $\Delta H_p$  – převýšení pravého svahu,  $d_l$  – délka levého svahu,  $d_p$  – délka pravého svahu.

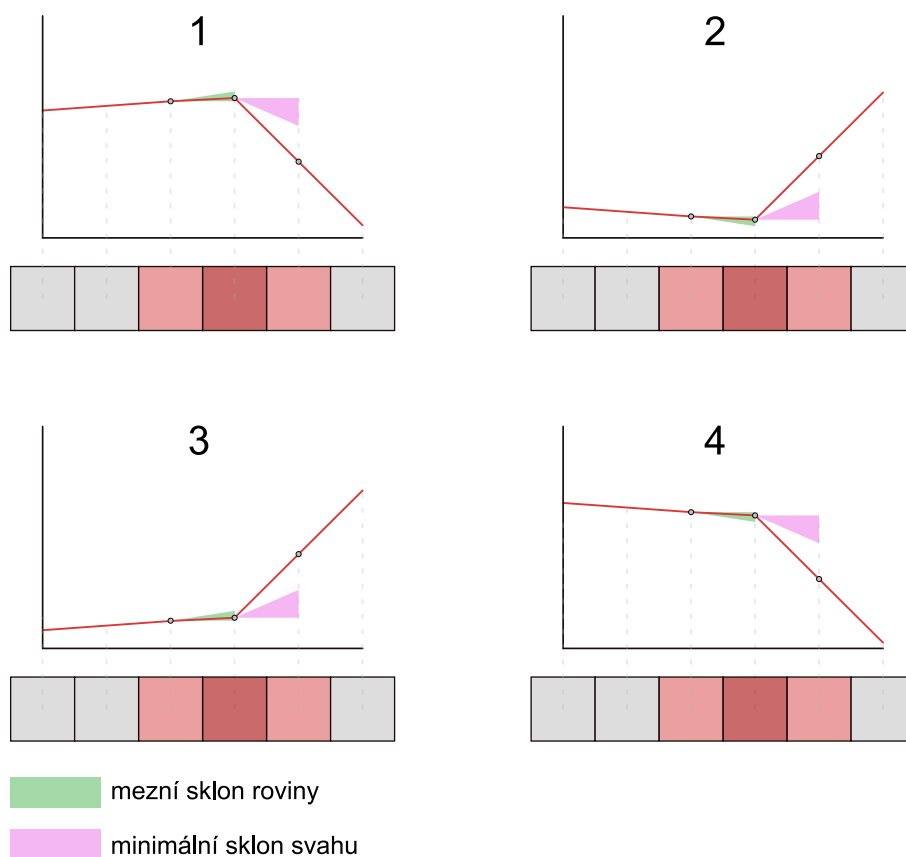
Analogicky jako v případě detekce hřbetnic je hodnota koeficientu vypočtena pro každý pixel splňující základní podmínku údolnice. Rastr digitálního modelu je taktéž zpracováván ve 4 fázích – dekompozice na profily ve 4 směrech. V každé fázi je vytvořen prázdný rastr pro zápis hodnot koeficientů a na závěr jsou tyto 4 rastry sečteny v jeden výsledný.

#### 3.2.4.4 Detekce lomových hran

Poslední z trojice terénních hran jsou lomové hrany. Lomová hrana představuje takový typ hrany, kdy jeden ze svahů je téměř rovina a druhý svah naopak rovinou není. Tyto uvedené předpoklady je třeba popsat pomocí určitých přesných kritérií, k čemuž je třeba stanovit určité mezní hodnoty. Pro určení roviny byl již zaveden *mezní sklon roviny*, který představuje v absolutní hodnotě maximální možný sklon, který může svah mít, aby byl vyhodnocen jako rovina. Pokud jeden ze svahů bude tedy označen za rovinu, tak druhý ze svahů musí mít v absolutní hodnotě určitý minimální sklon, aby byl naplněn předpoklad lomové hrany. Tato hodnota je označena dále jako *minimální sklon svahu*. Volba hodnoty mezního sklonu roviny již byla popsána, zvolená hodnota je  $5^\circ$ . Druhá mezní hodnota – minimální sklon svahu byla zvolena na  $30^\circ$ , přičemž volba vychází z testování nad reálnými skalními útvary, přičemž hodnota se může jevit poněkud vysoká, avšak bylo důležité hodnotu zvolit dost vysokou, aby jako lomová hrana nebylo označeno zbytečně velké množství pixelů patřících do jiné kategorie (hřbetnice, údolnice).

Při analýze profilu po trojicích pixelů může být pixel vyhodnocen jako část lomové hrany ve čtyřech případech:

1. Sklon jednoho svahu je kladný a menší než mezní sklon roviny a zároveň sklon druhého svahu je záporný (klesající svah) a v absolutní hodnotě větší než minimální sklon svahu (situace 1 na obr. č. 29).
2. Sklon jednoho svahu je záporný a v absolutní hodnotě menší než mezní sklon roviny a zároveň sklon druhého svahu je kladný (stoupající svah) a větší než minimální sklon svahu (situace 2 na obr. č. 29).
3. Sklon obou svahů je kladný a zároveň sklon jednoho svahu je menší než mezní sklon roviny, ale sklon druhého svahu je větší než minimální sklon svahu (situace 3 na obr. č. 29).
4. Sklon obou svahů je záporný a zároveň sklon jednoho svahu je v absolutní hodnotě menší než mezní sklon roviny a sklon druhého svahu je v absolutní hodnotě větší než minimální sklon svahu (situace 4 na obr. č. 29).



Obr. 29: Možné typy lomových hran.

Pokud daný pixel splňuje jednu z uvedených podmínek, tak v další fázi je třeba, stejně jako u předchozích terénních hran, kvantifikovat míru významnosti identifikované lomové hrany. Koeficient míry významnosti je v případě lomových hran založen na hodnotách sklonů mezi analyzovaným pixelem a dvěma okolními a délce strmějšího svahu. Formálně lze vztah pro koeficient významnosti lomových hran  $LoH_v$  vyjádřit jako

$$LoH_v = d_s \cdot |\varphi_1 - \varphi_2|,$$

kde  $d_s$  je délka strmějšího svahu (měřená jako spojnice krajních bodů svahu),  $\varphi_1$  sklon mezi pixelem před analyzovaným pixelem a analyzovaným pixelem,  $\varphi_2$  pak sklon mezi analyzovaným pixelem a pixelem následujícím. Ze vztahu vyplývá, že významnost lomové hrany závisí na rozdílu sklonů obou svahů, což odpovídá základní představě o významnosti tohoto typu terénní hrany – čím větší rozdíl sklonů, tím výraznější změna v průběhu terénu. Druhým parametrem vstupujícím do vztahu je délka strmějšího svahu, která v sobě částečně nese informaci o převýšení strmé části lomové hrany, přičemž čím delší strmější svah je, tím významnější lomová hrana je.

Výstupem je opět rastr s hodnotami koeficientů vzniklý součtem čtyř dílčích rastrů do nichž jsou zapisovány hodnoty koeficientů při procházení DMR ve 4 dílčích směrech.

### 3.2.5 Tvorba a zpracování výstupů

Tato kapitola je zaměřena na popis způsobu zpracování výstupů předešlých částí – rastrů, které ve svých nenulových hodnotách nesou informaci o výskytu terénní hrany, resp. o její významnosti. Cílem je na základě těchto rastrů vytvořit liniovou reprezentaci průběhu terénních hran. Hlavním cílem je získat takovou reprezentaci linií, kterou bude možné použít pro porovnání s liniemi odvozenými z kartografických reprezentací, což znamená, že hlavním záměrem není vytvořit dokonalou reprezentaci linií, ale takovou, kterou bude možné pro daný účel využít.

Celý postup zahrnuje následující kroky:

1. Zpracování rastrů s cílem vytvořit generalizovaný binární rastr, jehož nenulové hodnoty mají ideálně liniový charakter.
2. Převod nenulových segmentů upraveného rastru na linie (vektORIZACE).
3. Generalizace vytvořených linií.

#### 3.2.5.1 Zpracování rastrů s hodnotami významnosti terénních hran

V rámci této části je popsán postup zpracování rastrů s hodnotami významnosti terénních hran s cílem získat binární rastr s hodnotami 0 a 1, kde nenulové hodnoty ideálně vytváří liniové segmenty odpovídající průběhu dané terénní hrany. Ke zpracování rastrů byly využity primárně dvě knihovny dostupné pro programovací jazyk Python – NumPy, SciPy. Rastr byl zpracováván ve formě 2D pole (`numpy.array`).

Prvním krokem je využití metody **potlačení nemaximálních hodnot**, která se využívá při zpracovávání digitálního obrazu s cílem ztenčit hrany. Aby bylo možné metodu aplikovat, je nejprve nutné získat hodnoty gradientu, resp. směru gradientu, k čemuž byl využit Sobelův operátor (viz kapitola [2.4.1.1](#)). Sobelův operátor je aplikován přímo na rastr s hodnotami významnosti terénních hran (v nenulových hodnotách) a jeho aplikací vznikají dva nové rastry – rastr s hodnotami gradientu a také rastr s hodnotami úhlu, který odpovídá směru průběhu hrany.

Následně je tedy procházen rastr s hodnotami významnosti terénních hran a je aplikováno potlačení nemaximálních hodnot. Rastr je procházen postupně po pixelech, přičemž pro daný pixel je nalezena odpovídající hodnota směru hrany. Na základě směru hrany v daném místě jsou vybrány dva okolní pixely k danému pixelu. Tyto sousední pixely jsou vybrány od daného pixelu ve směru kolmém na směr průběhu hrany. Z této trojice pixelů je následně uchován pouze ten s největší hodnotou významnosti terénní hrany, resp. jeho hodnota je zapsána do nového rastru pro zápis hodnot.

Druhým krokem zpracování je **prahování s hysterezí**. Na začátku je třeba určit dvě prahové hodnoty, podle kterých budou hodnoty vstupního rastru rozděleny. Hodnoty prahů byly zvoleny relativně vzhledem k hodnotám vstupního rastru, jelikož hodnoty významnosti terénních hran se výrazně liší pro různé skalní útvary. Stanovení prahů relativně tak zajišťuje lokální adaptaci metody na různé skalní útvary. Stanovení hodnot prahů bylo provedeno experimentálně na základě testování nad vybranými rastry, a to následovně. Horní práh byl zvolen

jako hodnota, pro kterou platí, že 65 % hodnot je menších než tato hodnota (65. percentil). Spodní práh byl pak zvolen jako 20. percentil hodnot. Oba percentily jsou vypočteny pouze z nenulových hodnot.

Na základě zvolených prahových hodnot jsou hodnoty vstupního rastru rozděleny do 3 kategorií:

1. hodnoty větší než horní práh (65. percentil),
2. hodnoty menší než horní práh (65. percentil) a zároveň větší než spodní práh (20. percentil),
3. hodnoty menší než spodní práh (20. percentil).

Vstupní rastr byl tak převeden na rastr nabývající 3 různých hodnot. Pixelům patřícím do 1. skupiny byla přiřazena hodnota 2, pixelům ze 2. skupiny hodnota 1 a pixelům ze 3. skupiny pak hodnota 0. Tento rastr je v dalším kroku procházen po jednotlivých pixelech a je převeden na binární rastr s hodnotami 0 a 1 následujícím způsobem:

- Pixely patřící do 1. kategorie (hodnota 2) jsou označeny jako součást hrany a v novém rastru získávají hodnotu 1.
- Pixely patřící do 3. kategorie (hodnota 0) nejsou součástí terénní hrany a jsou v novém rastru označeny hodnotou 0.
- Pixely patřící do 2. kategorie (hodnota 1) jsou vyhodnoceny následovně:
  - Pokud daný pixel sousedí s pixelem z 1. kategorie, tak je označen jako součást hrany a získává v novém rastru hodnotu 1.
  - Pokud daný pixel nesousedí s pixelem z 1. kategorie, tak není součástí hrany a je označen hodnotou 0.

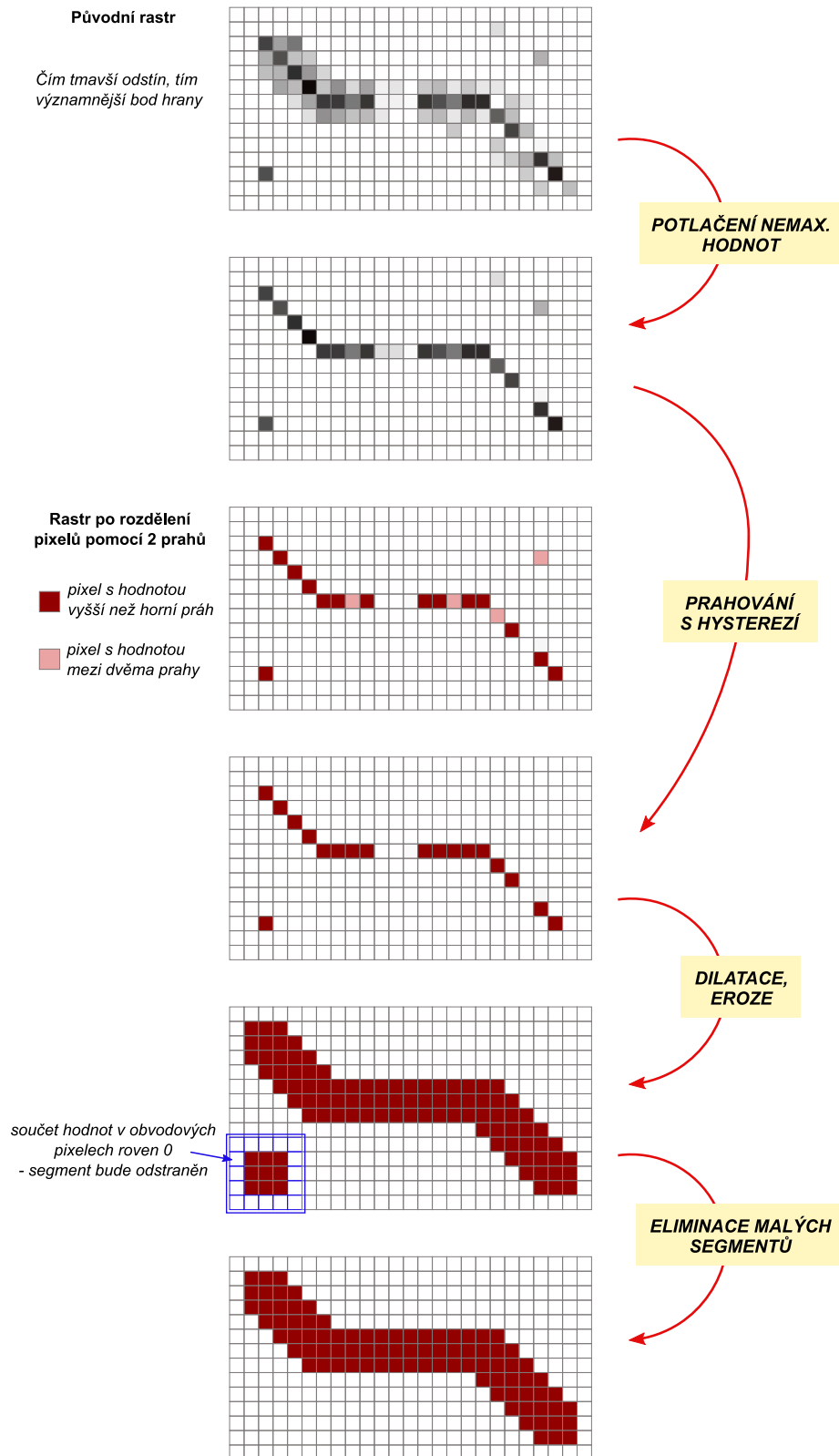
Vzniklý binární rastr pak ve svých nenulových hodnotách nese informaci o průběhu dané hrany. Tyto části rastru jsou však v této fázi ve většině případů nespojitě a často tvořené pouze jednotlivými izolovanými pixely. Z tohoto důvodu je rastr dále zpracován s cílem získat delší a spojitě segmenty.

Třetím krokem zpracování je **aplikace morfologických filtrů** na vytvořený binární rastr. Cílem je v binárním rastru vytvořit spojitě segmenty nenulových hodnot ideálně odpovídající průběhu dané terénní hrany. K tomuto účelu jsou využity dvě morfologické operace – **dilatace** a **eroze**.

Jako první je na rastr použita dilatace se čtvercovým strukturním elementem o velikosti  $15 \times 15$ . Na získaný výstup je následně aplikována eroze se čtvercovým strukturním elementem velikosti  $13 \times 13$ . Uvedený postup tedy odpovídá tzv. uzavření obrazu, s tím, že strukturní element není u obou operací shodný. Větší strukturní element byl u dilatace využit z toho důvodu, že pro další zpracování je vhodnější získat širší čáru, ze které bude stejně vytvářena střednice, než aby vznikla úzká a nespojitá linie.

Posledním krokem zpracování rastru je **eliminace malých segmentů**, které nemají liniový charakter a které zůstaly po aplikaci dilatace a eroze. Rastr je procházen pomocí čtvercového vyhledávacího okna o velikosti  $13 \times 13$ . V každém místě jsou kontrolovány obvodové pixely v rámci okna. Pokud je součet hodnot pixelů v těchto obvodových pixelech roven 0, tak jsou všechny pixely uvnitř okna přepsány na hodnotu 0. Nulový součet obvodových pixelů znamená, že daný objekt není napojený na žádný další objekt a nevytváří tak žádný větší celek.

Výstupem výše popsaného procesu je binární rastr, ve kterém nenulové hodnoty v ideálním případě reprezentují přibližný průběh dané terénní hrany. Celý popsaný postup je znázorněn na obrázku č. [30](#).



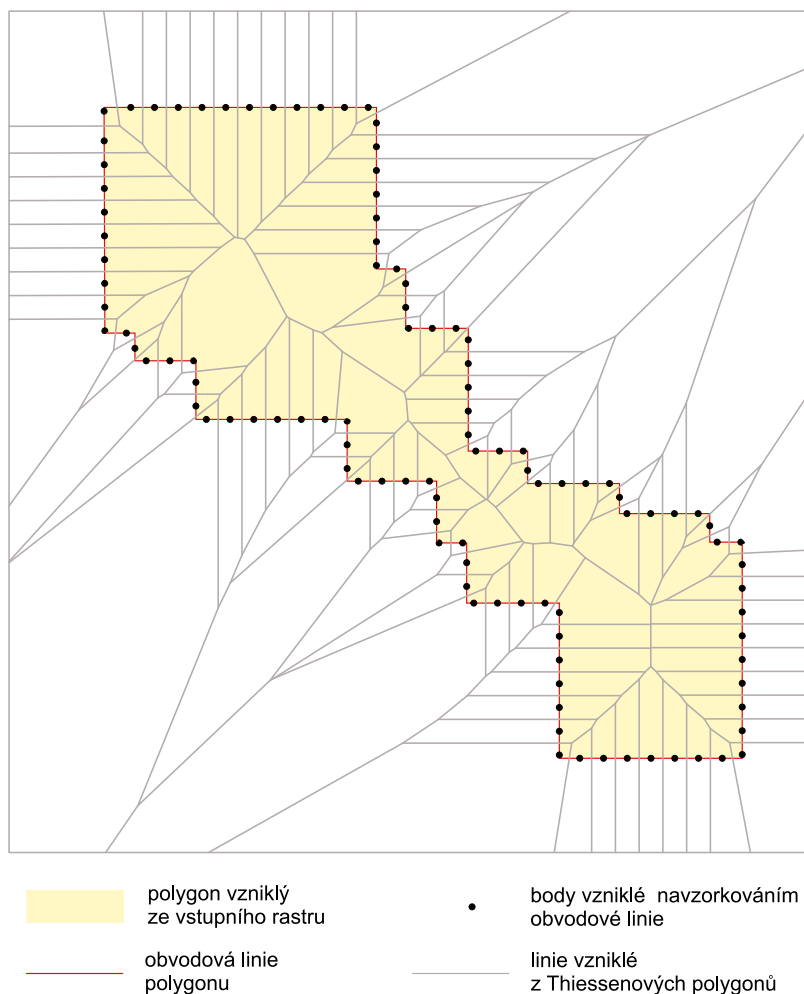
Obr. 30: Zpracování rastrů s hodnotami významnosti terénních hran – ilustrace postupu.

### 3.2.5.2 Převod vybraných segmentů zpracovaných rastrů na linie

Tato část je zaměřena na další fázi zpracování rastrů s hodnotami významnosti terénních hran. Bude zde popsán způsob, kterým lze vybrané segmenty upravených binárních rastrů převést na linie a získat tak reprezentaci průběhu terénních hran ve vektorové podobě.

Prvním krokem zpracování je převod rastru na polygon, přičemž vstupní rastr byl před tímto krokem upraven tak, že jeho nulové hodnoty byly přepsány na hodnotu `nodata`, čímž byly na polygon převedeny pouze segmenty s hodnotou 1 – potenciální terénní hrany. Cílem dalších kroků je získat středovou linii tohoto polygonu, která by měla odpovídat průběhu dané terénní hrany.

V dalším kroku je polygon převeden na linie, čímž byla získána vrstva obvodových linií daného polygonu. Dále je obvodová linie navzorkována s krokem 0,2 m a převedena na body. Velikost kroku pro navzorkování byla zvolena jednak na základě testování nad reálnými daty a jednak s ohledem na prostorové rozlišení vstupního DMR (2 m). Nad vzniklými body jsou následně vygenerovány Thiessenovy polygony. Vygenerované Thiessenovy polygony jsou dále převedeny na linie a vzniklé linie jsou rozděleny v lomových bodech na jednotlivé části. Výsledek uvedeného je znázorněn na obrázku č. 31.



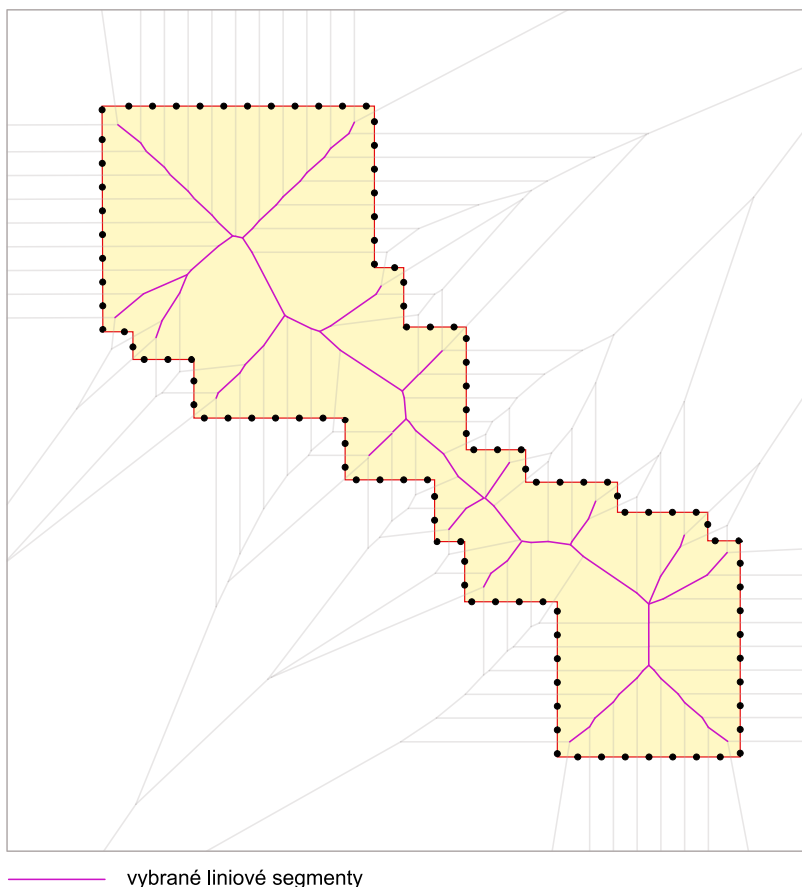
**Obr. 31:** Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů 1/3

Z liniových segmentů vzniklých na základě Thiessenových polygonů jsou následně vybrány ty, pro které platí současně obě podmínky:

- daný liniový segment se nachází uvnitř polygonu,
- daný segment nemá průnik s obvodovou linií daného polygonu.

Takto vybrané liniové segmenty jsou znázorněny na obrázku č. [32](#).

Provedený postup zajistí odfiltrování velkého množství nežádoucích linií (resp. liniových segmentů) avšak je zřejmé, že vzniklá linie ještě není ideální a bude vyžadovat další zpracování. Hlavním problémem linie jsou postranní segmenty, které jsou pozůstatkem Thiessenových polygonů a neodpovídají očekávanému průběhu středové linie. Část těchto dílčích linií lze odstranit s využitím negativního bufferu kolem původního polygonu. Vybrané liniové segmenty jsou všechny spojeny v jednu linii, která je pak rozdělena na dílčí linie v uzlových bodech. Z těchto dílčích linií jsou následně odstraněny ty, které mají průnik s plochou vzniklou jako



**Obr. 32:** Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů 2/3

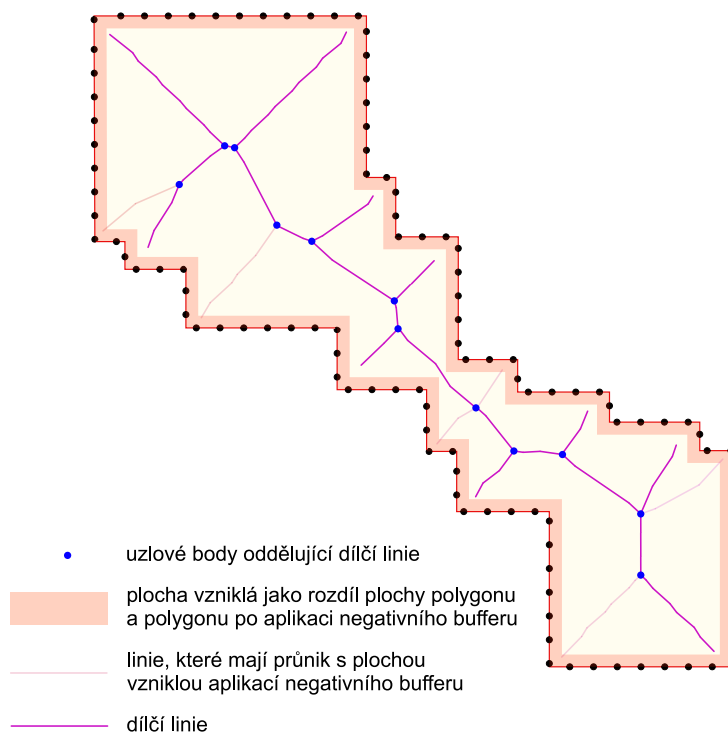
rozdíl původního polygonu a polygonu po aplikaci negativního bufferu o velikosti  $-0.2$  m (viz obrázek č. 33). Lze totiž předpokládat, že středová linie nebude mít s plochou vzniklou aplikací negativního bufferu průnik, ale část postranních linií ano a tuto část lze tedy eliminovat.

Z uvedeného obrázku je zřejmé, že s pomocí negativního bufferu nelze odstranit všechny nežádoucí linie. Z tohoto důvodu je nutné linii dále upravit jiným způsobem, resp. linie určitým způsobem generalizovat, což bude popsáno v následující podkapitole.

Postup je nutné mírně poupravit ve speciálním případě, že převodem binárního rastru na polygon vznikne více polygonů, které spolu mají pouze bodový průnik, tj. buňky rastru spolu sousedí pouze přes roh. V takovém případě by totiž výše popsaným postupem vznikly nespojitě linie v jednotlivých polygonech.

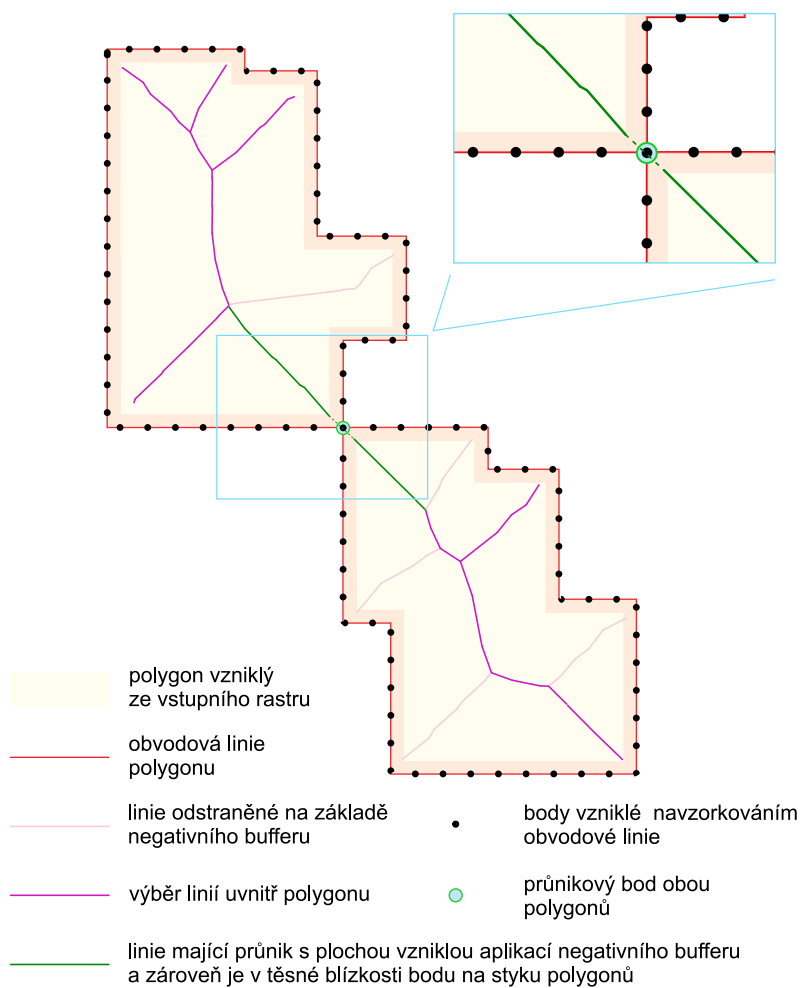
Pokud taková situace nastane, je v místech průniku polygonů vytvořen bod, který tento průnik reprezentuje, a výše provedené výběry jsou upraveny tak, že linie, resp. liniové segmenty nejsou odstraněny, pokud mají s tímto bodem průnik nebo se alespoň nachází v jeho blízkém okolí definovaném vzdáleností 2 m.

Při převodu Thiessenových polygonů na linie může nastat situace, kdy vzniklá linie nemá s průnikovým bodem dvou polygonů přímo průnik, ale je u něj velmi blízko (to se stane tehdy,



**Obr. 33:** Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů 3/3

pokud jeden z bodů vzniklých navzorkováním obvodové linie leží na průniku obou polygonů) – proto je zvolena 2m tolerance při jejich výběru. Zároveň je pro tyto případy na závěr využita funkce `arcpy.Snap_edit()` s tolerancí 2 m, čímž dojde k případnému spojení linií na průniku polygonů. Uvedená situace je znázorněna na obrázku č. 34.

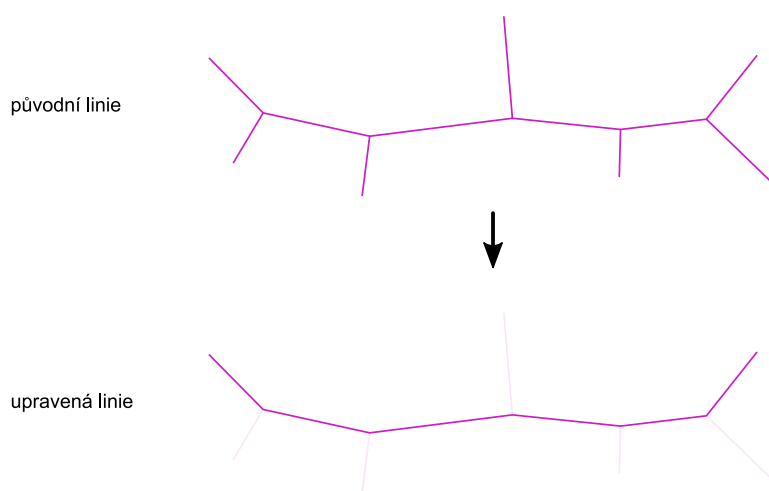


**Obr. 34:** Ilustrace postupu pro vektorizaci segmentů zpracovaných rastrů – speciální případ

### 3.2.5.3 Generalizace vytvořených čar terénní kostry

V rámci této části bude představen postup pro generalizaci vytvořených čar terénní kostry, která představuje poslední krok jejich zpracování. Linie reprezentující průběh terénních hran, vytvořené na základě postupu uvedeného v předchozí kapitole, mají určité nedostatky, přičemž hlavním problémem linií je jejich rozvětvení a postranní segmenty. Tyto problémy linií jsou přirozeným důsledkem použití Thiessenových polygonů za účelem získání středové linie a cílem následujícího postupu bude tyto problémy odstranit, resp. potlačit.

Mějme modelovou linii – viz obrázek č. 35, kterou je třeba upravit. V rámci úprav je třeba eliminovat postranní segmenty a koncová rozvětvení, přičemž příklad takové úpravy na modelové linii je naznačen taktéž na obr. č. 35.



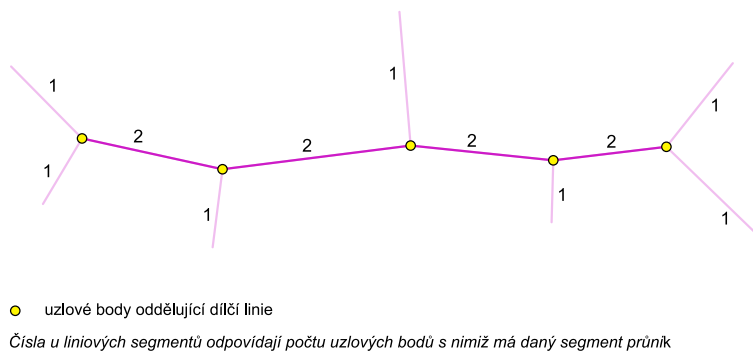
**Obr. 35:** Modelová linie a myšlenka její generalizace

Proces generalizace linie lze stručně popsat následujícími kroky:

1. Rozdělení linie v uzlových bodech.
2. Vytvoření uzlových bodů, představujících průniky jednotlivých částí linie.
3. Pro každou část linie je spočten počet uzlových bodů, se kterými se protíná.
4. Výběr linií, které mají průnik s dvěma uzlovými body – ty zůstanou zachovány po generalizaci.
5. Postupné procházení uzlových bodů.
  - (a) Pro každý uzlový bod vybrány části linií, které s ním mají průnik a zároveň nemají průnik s jiným uzlovým bodem.
  - (b) Pokud je taková část 1, tak je z linie odstraněna.
  - (c) Pokud je takových částí více než 2, tak je vybrána ta nejdelší a zbylé jsou odstraněny.

V prvním kroku je vstupní linie rozdělena v uzlových bodech. Následně je vytvořena bodová vrstva průniků liniových segmentů (vznikne jako průnik liniových segmentů se sebou samými). Pro další zpracování linie je třeba pro každý dílčí segment získat informaci o tom, s kolika uzlovými body má průnik. K tomu je využit prostorový join (`arcpy.SpatialJoin_analysis()`), čímž v liniové vrstvě přibude atribut udávající právě počet bodů, s nimiž má daný segment průnik.

Na základě počtu průniků s průnikovými body jsou vybrány ty liniové segmenty, jejichž počet průniků je větší než 1, přičemž tyto segmenty by měly ideálně tvořit základní „kostru“ linie (viz obrázek č. 36). Tyto části linie zůstanou po generalizaci zachovány. Stejně tak jsou zachovány segmenty, které mají počet průniků roven 0 – to může odpovídat jedné situaci, kdy daná linie má jen jednu spojitou část (průnikem se sebou samou nevznikne žádný bod), nebo se jedná o oddělený segment linie.

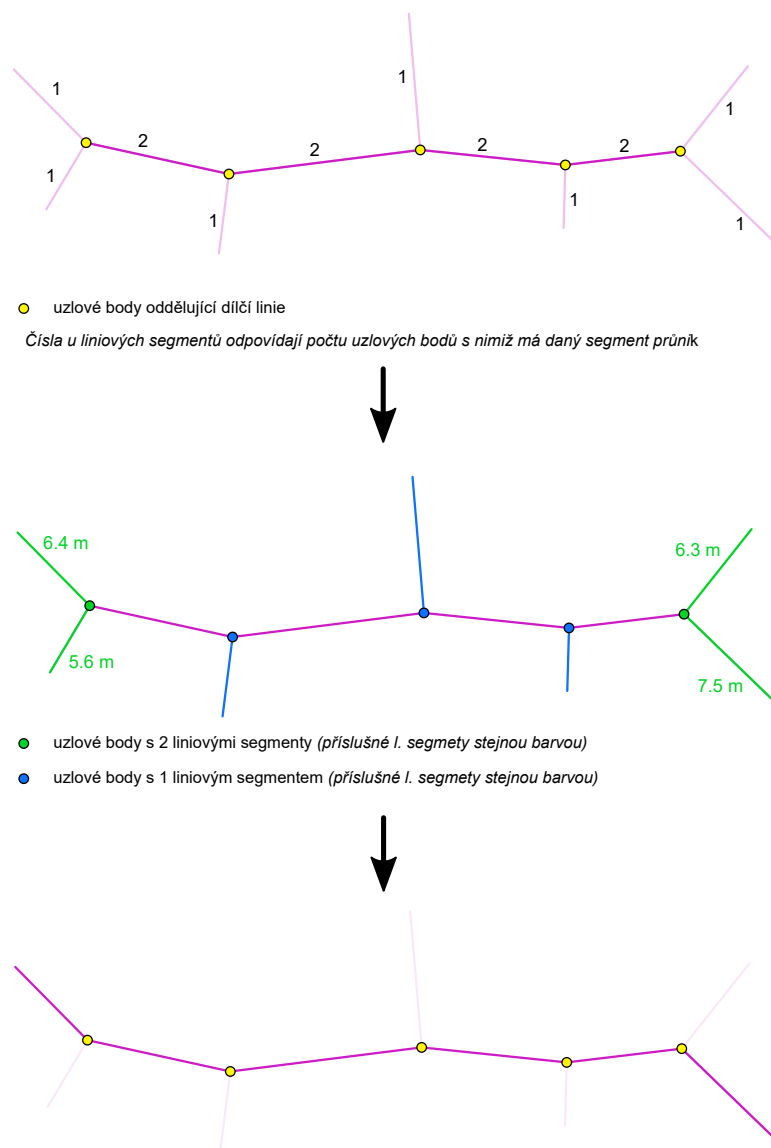


**Obr. 36:** Modelová linie – proces generalizace 1/2. Vysvětlení v textu.

V další fázi jsou postupně procházeny jednotlivé uzlové body a pro každý bod jsou nalezeny liniové segmenty, které mají s daným bodem průnik a které zároveň nemají průnik s jiným bodem, tzn., že mají počet průniků roven 1. Podle počtu segmentů náležících danému uzlovému bodu jsou pak segmenty vyhodnoceny následovně:

1. Danému bodu náleží 1 liniový segment – daný segment je odstraněn a v generalizované linii nebude.
2. Danému bodu náleží 2 liniové segmenty – je ponechán delší z nich, kratší je odstraněn.
3. Danému bodu náleží 3 a více liniových segmentů – jsou ponechány dva nejdelší, nejkratší je odstraněn
  - tato situace však nastává velmi ojediněle – v jednotkách případů a jedná se zpravidla o situace kdy je celá linie tvořena pouze 3 segmenty

Aplikace daného postupu na modelové linii je znázorněna na obrázku č. 37



**Obr. 37:** Modelová linie – proces generalizace 2/2. Vysvětlení v textu.

Pomocí uvedeného postupu lze tedy linie generalizovat a získat tak co vektorovou aproximaci průběhu dané terénní hrany. Popsaný postup funguje v naprosté většině případů velmi spolehlivě. V ojedinělých případech mohou vznikat zvláštní či nežádoucí artefakty, ale s ohledem na využití dat primárně pro porovnání s liniemi odvozených z kartografických reprezentací to z hlediska řešení práce nepředstavuje žádný problém.

### 3.3 Porovnání dvojic čar terénní kostry

V této kapitole bude představen postup pro porovnání dvou sad čar terénní kostry. První sadou čar terénní kostry jsou linie odvozené na základě kartografických reprezentací skalních útvarů (viz kapitolu 2.2). Druhá – referenční sada linií vznikla na základě DMR 5G, přičemž proces jejího vzniku je detailně popsán v předešlé kapitole (kapitola 3.2). Obě datové sady jsou tvořeny vektorovými reprezentacemi tří typů čar terénní kostry – hřbetnic, údolnic a lomových hran. V následující části práce bude tedy popsán postup, pomocí kterého bude možné tyto tři dvojice datových sad určitým způsobem porovnat a vyslovit se k míře jejich shody.

#### 3.3.1 Příprava dat

Pro účely porovnání ČTK je třeba obě sady napřed určitým způsobem upravit. Jako první je provedena generalizace 2 typů čar terénní kostry vzniklých na základě kartografických reprezentací – hřbetnic a údolnic. Finální podoba obou těchto typů ČTK v této datové sadě vznikla použitím Thiessenových polygonů, jejichž pozůstatky tvoří části linií a ty je třeba odstranit. Jedná se primárně o velmi podobné nežádoucí jevy jako v případě linií odvozovaných na základě DMR 5G – rozvětvení na koncích linií a postranní segmenty. Z tohoto důvodu je pro generalizaci těchto linií použit stejný postup jako v případě ČTK z DMR 5G – pro detailní popis viz kapitolu 2.2. Generalizace je provedena pouze pro hřbetnice a údolnice vzniklé na základě kartografických reprezentací, lomové hrany vznikly odlišným způsobem a není třeba u nich tento krok provádět.

Druhým krokem v rámci přípravy dat je **převedení linií na bodovou reprezentaci**. Tento krok je proveden primárně s ohledem na vlastnosti dat. Obě datové sady reprezentují průběh terénních jen s určitou přesností, která je ovlivněna jednak použitými daty, ale také využitými metodami, pomocí kterých byla daná reprezentace odvozena. Navíc obě datové sady budou zatíženy určitým množstvím nejistoty, která vyplývá z postupu jejich odvození. Ten je poměrně komplikovaný s řadou kroků, z nichž každý v určitém smyslu ovlivňuje přesnost výsledku. Z toho plyne, že by mělo být vhodnější spíše „hrubší“ (generalizované) srovnání obou datových sad, což by mělo přinést vypovídající výsledek. Volba tohoto postupu byla rovněž dána dosaženými výsledky, přičemž obvyklé postupy pro srovnání dvou linií v čistě geometrickém smyslu, které předpokládají jejich velkou podobnost, nemají pro řešenou úlohu smysl, resp. dává smysl je využít až na určitou, relativně malou, podmnožinu dat. Každá linie je tak ve výsledku reprezentována množinou bodů, které vzniknou jejím navzorkováním s určitým krokem. To lze vnímat jako určitou formu generalizace a zároveň to z hlediska dalšího zpracování přináší výhody.

Základním parametrem při převodu linií na body je krok pro navzorkování linií. Tento krok by ideálně neměl být moc malý, aby potlačil nežádoucí detaily linií, ale zároveň by neměl být moc velký, aby nedocházelo ke ztrátě informace o průběhu linie a zároveň, aby nenastávalo velké množství situací, kdy bude linie reprezentována jen jedním nebo velmi malým počtem bodů. Velikost kroku byla experimentálně na testovací sadě dat zvolena na 5 m, přičemž ve vybraných situacích je použit krok poloviční – 2,5 m.

Rozhodnutí o volbě kroku je provedeno na základě absolutní hodnoty rozdílu zbytků po

vydělení délek obou linií větším krokem (5 m). Pro obě linie v daném polygonu se určí zbytek po vydělení jejich délky 5m krokem a následně se z hodnot zbytků vypočte absolutní hodnota jejich rozdílu. Pokud je absolutní hodnota rozdílu zbytků větší než 2,5 m, tak je použit menší 2,5m krok. Jedná se tedy o situace, kdy použití menšího kroku přinese z hlediska počtu vzniklých bodů jiný výsledek než použití většího kroku. Zároveň platí, že v rámci jednoho polygonu (skalního útvaru) je využit vždy stejný krok vzorkování pro obě linie.

Pro lepší pochopení vysvětlíme postup na příkladě dvojice linií A a B, jejichž délku označíme  $d_A$  a  $d_B$

$$A...d_A = 14,5 \text{ m}$$

$$B...d_B = 10,5 \text{ m}$$

Vydělením obou délek délkou většího kroku získáme hodnoty zbytků ( $z_A, z_B$ ):

$$d_A : 5 = 14,5 : 5 = 2 \text{ (} z_A = 4,5 \text{)}$$

$$d_B : 5 = 10,5 : 5 = 2 \text{ (} z_B = 0,5 \text{)}.$$

Absolutní hodnota rozdílu zbytků je pak rovna 4, (větší než 2,5), a tak by obě linie byly navzorkovány krokem 2,5 m. Naproti tomu například linie s délkami 12 m a 13 m by byly navzorkovány 5m krokem.

Celý proces převodu linií na body probíhá pak následujícím způsobem.

1. Procházení polygonové vrstvy skalních útvarů po jednotlivých objektech.
2. Na základě id daného polygonu jsou vybrány příslušné linie stejného typu v obou datových sadách, přičemž zde mohou nastat 3 situace:
  - (a) V daném polygonu není linie ani z jedné sady.
    - Vznikají dvě prázdné množiny bodů.
  - (b) V daném polygonu je linie pouze z jedné datové sady.
    - Vzniká jedna prázdná množina bodů a množina bodů vzniklá navzorkováním existující linie s krokem 5 m.
  - (c) V daném polygonu jsou linie z obou datových sad.
    - Je určen krok pro navzorkování a jsou vytvořeny dvě množiny bodů pro příslušné linie.
3. Vzniklé množiny bodů (pokud byly vytvořeny – situace (b), (c)) jsou oříznuty na plochu zvětšeného polygonu, který vznikne aplikací 10m bufferu na původní polygon skalního útvaru. Tento krok je proveden, jelikož relativně často nastává v obou datových sadách situace, kdy nejsou linie kompletně uvnitř polygonu. To může být dáno případně i nesprávným umístěním polygonu, a tak je využita právě 10m tolerance.

Uvedeným postupem tak vzniknou pro každý typ ČTK dvě datové sady:

1. bodová reprezentace linií vzniklých z kartografických reprezentací,
2. bodová reprezentace linií vzniklých na základě DMR 5G.

Celkem tedy 6 datových sad (3 dvojice).

### 3.3.2 Porovnání ČTK

Tato část se zabývá popisem metodiky, která byla využita pro porovnání dvojic čar terénní kostry v rámci polygonů skalních útvarů. V následujícím textu budou popsány jednotlivé parametry, které jsou k hodnocení využity a pomocí kterých lze určitým způsobem hodnotit míru shody obou datových sad, a to jak na úrovni konkrétního polygonu, tak na úrovni všech polygonů skalních útvarů.

Prvním krokem postupu je zjištění počtu polygonů, ve kterých se vyskytují linie z obou datových sad, tzn. polygonů, ve kterých má smysl provádět porovnání bodových množin. Polygony jsou tak rozděleny do 4 kategorií:

1. Polygony, ve kterých se vyskytují linie z obou datových sad.
2. Polygony, ve kterých se nachází pouze linie z referenční datové sady – ČTK vzniklé na základě DMR 5G (dále označovány jako *referenční linie*).
3. Polygony, v nichž se vyskytují jen linie z datové sady vzniklé na základě kartografických reprezentací (dále označovány jako *kartografické linie*).
4. Polygony, v nichž se nevyskytuje ani jeden typ linií.

Uvedené rozdělení lze schematicky znázornit následovně (tabulka č. 2).

		kart. linie	
		ano	ne
ref. linie	ano	1	2
	ne	3	4

**Tab. 2:** Rozdělení polygonu dle výskytu různých typů linií.

Na základě provedeného rozdělení polygonů lze určit podíl polygonů, ve kterých se vyskytují oba typy linií a které budou tedy vstupovat do další fáze hodnocení míry shody. Zároveň lze na základě rozdělení získat údaj částečně vypovídající o úplnosti kartografických linií, a to jako podíl počtu polygonů s oběma typy linií (typ 1) a součtu všech polygonů s kartografickými liniemi (typ 1 + typ 3). Dále například počet polygonů, kde se vyskytují pouze referenční linie (typ 2) může indikovat situace, kde nemusí být kartografická reprezentace úplně spolehlivá.

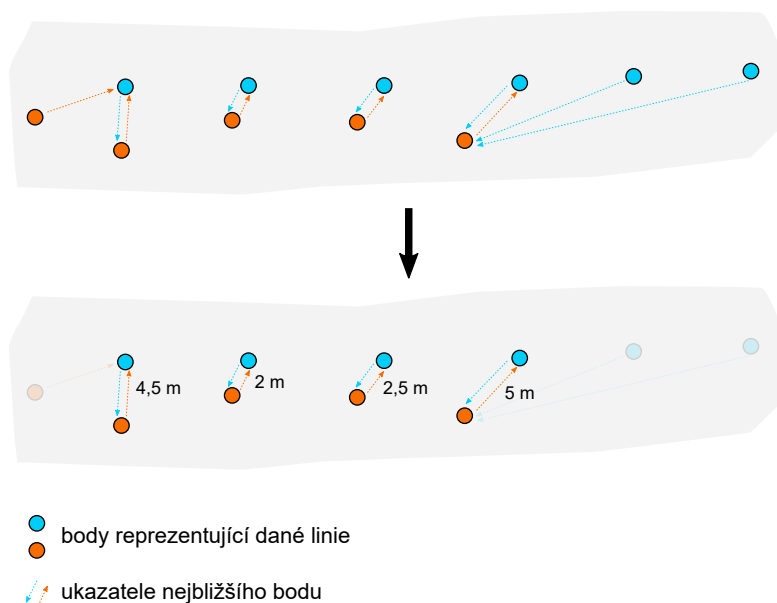
Polygony, ve kterých se vyskytují oba typy linií, jsou dále analyzovány. Samotný výskyt obou typů linií nemusí nutně znamenat, že se linie určitým způsobem shodují, resp., že reprezentují tentýž objekt ve smyslu konkrétní ČTK, a proto je třeba tyto situace vyhodnotit

detailněji. Nejjednodušším přístupem je porovnání délek obou linií. Linie jsou generalizovaně reprezentovány množinou bodů, tzn. délka linie je reprezentována počtem bodů, a tak prvním ukazatelem míry shody je **rozdíl počtu bodů obou datových sad** (resp. jeho absolutní hodnota). Malý rozdíl bude pravděpodobně znamenat lepší shodu než rozdíl velký, avšak jde pouze o hrubou charakteristiku, která ale nic nevyovídá o vzájemném vztahu linií z hlediska polohy a tvaru.

Druhý ukazatel míry shody v sobě částečně nese informaci o tvarové podobnosti linií (resp. bodových množin) a lze jej označit jako **podíl blízkých bodů**. Hodnota ukazatele je určena následujícím způsobem.

- Pro každý bod reprezentující kartografickou linii je nalezen nejbližší bod referenční linie.
- Zároveň pro každý bod referenční linie je nalezen nejbližší bod kartografické linie.
- Následně jsou vybrány ty dvojice bodů, pro které platí, že dané dva body jsou si navzájem nejbližšími body.

Podíl takto vybraných bodů vzhledem k součtu počtu bodů obou linií je pak označen jako **podíl blízkých bodů**. Uvedený postup je znázorněn na obrázku č. 38.



**Obr. 38:** Ilustrace nalezení blízkých bodů.

V situaci na obrázku bylo z celkového počtu 11 bodů (5 + 6) vybráno 8 bodů, které mají odpovídající blízký bod, tzn. podíl blízkých bodů by v tomto případě byl  $\frac{8}{11} = 72,7\%$ .

Poměr blízkých bodů je určitou charakteristikou tvarové podobnosti analyzovaných linií, avšak nevyovídá nic o polohové odchylce příslušných linií. Další ukazatel by tak měl být schopen

zohlednit i tuto charakteristiku. Tato třetí charakteristika je označena jako **průměrná odchylka blízkých bodů** a je vypočtena jako průměrná vzdálenost blízkých bodů. Pro situaci vyobrazenou na obr. č. 38 by výpočet odchylky ( $o_b$ ) byl následující

$$o_b = \frac{4,5 + 2 + 2,5 + 5}{4} = 3,5.$$

Pro každý polygon, v němž se vyskytují oba druhy linií jsou tedy vypočteny 3 výše popsané charakteristiky:

1. rozdíl počtu bodů obou datových sad,
2. podíl blízkých bodů,
3. průměrná odchylka blízkých bodů.

## 3.4 Výsledky

V rámci této kapitoly budou představeny získané výsledky. Celkem byly analyzovány 3 dvojice datových sad odpovídající třem typům čar terénní kostry:

- hřbetnicím,
- údolnicím,
- lomovým hranám.

Výsledky jsou v následujícím textu uvedeny po jednotlivých typech ČTK.

### 3.4.1 Hřbetnice

První část je věnována hřbetnicím. Výsledky jsou rozděleny do dvou částí – v první části jsou popsány výsledky na úrovni všech polygonů skalních útvarů a v druhé části jsou uvedeny vybrané výsledky míry shody na úrovni jednotlivých polygonů.

#### 3.4.1.1 Míra shody na úrovni všech polygonů

Kartografické hřbetnice se vyskytovaly celkem v 915 polygonech skalních útvarů, přičemž referenční hřbetnice byly detekovány v 20 195 polygonech. Podrobnější rozdělení polygonů dle výskytu hřbetnic z obou datových sad je uvedeno v tabulce č. 3.

	kartografické linie		součet řádků
	ano	ne	
referenční linie	<b>797</b>	<b>19 398</b>	<b>20 195</b>
	2,0 %	48,7 %	50,7 %
	<b>118</b>	<b>19 538</b>	<b>19 656</b>
	0,3 %	49,0 %	49,3 %
součet sloupců	<b>915</b>	<b>38 936</b>	<b>39 851</b>
	2,3 %	97,7 %	100 %

**Tab. 3:** Základní rozdělení polygonů dle výskytu typů hřbetnic.

Největší část polygonů (49 % – 19 538) představují polygony, v nichž se nevyskytuje ani jeden typ hřbetnic. Téměř stejný podíl (48,7 % – 19 398) je polygonů, v nichž se vyskytují pouze referenční linie (odvozené z DMR 5G). Pouze v 0,3 % polygonů (118) jsou jen kartografické hřbetnice a ve 2 % polygonů (797) se pak vyskytují hřbetnice z obou datových sad zároveň.

Z celkem 915 polygonů obsahujících kartografické hřbetnice, je 797 takových, že se v nich vyskytují i hřbetnice referenční. Tedy v 87,1 % polygonů s kartografickou hřbetnicí je i referenční hřbetnice a lze tedy předpokládat, že v těchto polygonech se hřbetnice skutečně vyskytuje. Naproti tomu z celkového počtu 20 195 polygonů, ve kterých byly detekovány referenční hřbetnice, jsou oba typy hřbetnic pouze ve 4 % z nich. Polygony, v nichž jsou pouze referenční linie, mohou indikovat možnou nespolehlivost kartografické reprezentace.

### 3.4.1.2 Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů

Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů byla analyzována pouze v polygonech, kde se vyskytují hřbetnice z obou datových sad, tj. v 797 případech (dále uvedené podíly polygonů hodnoty vyjádřeny procenty se vztahují právě k této hodnotě). K hodnocení míry shody byly využity 3 charakteristiky:

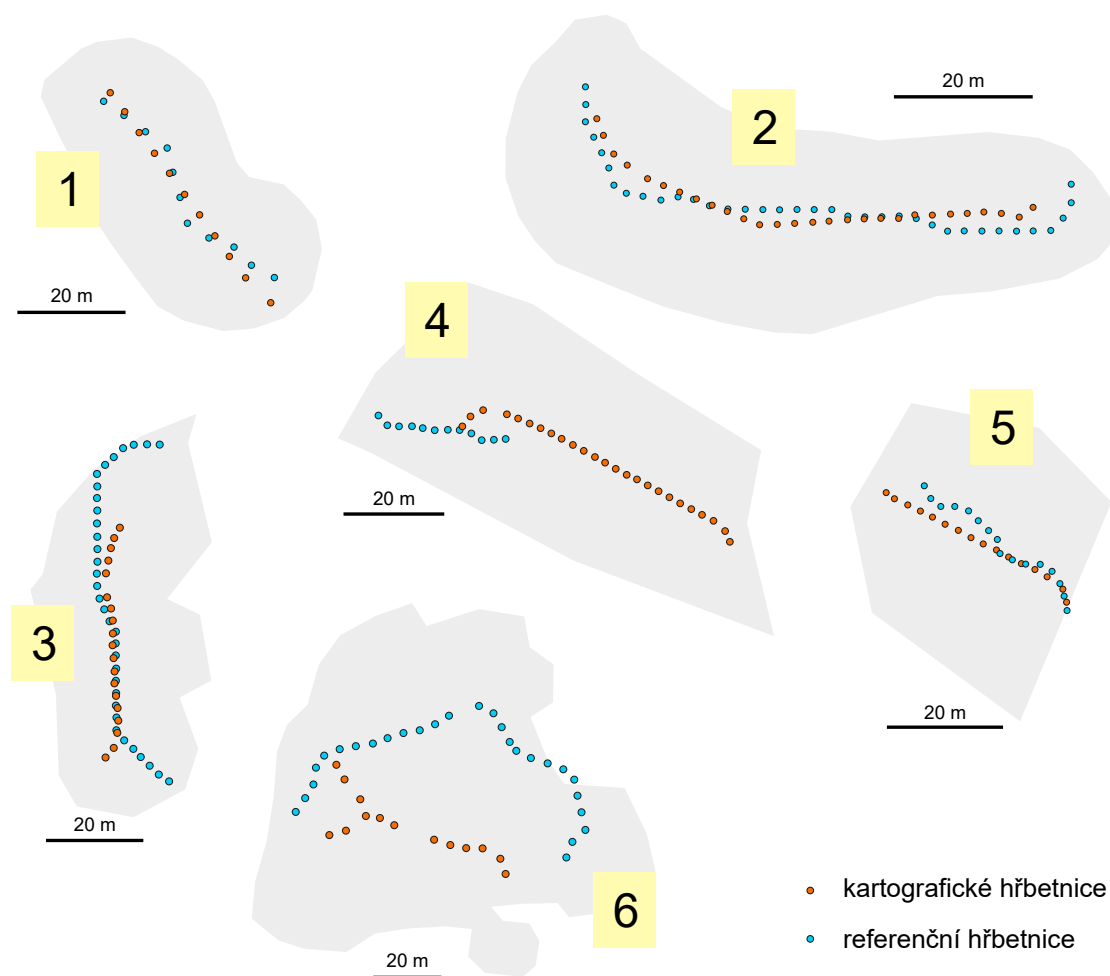
1. rozdíl počtu bodů obou datových sad,
2. podíl blízkých bodů,
3. průměrná odchylka blízkých bodů.

Pro větší názornost jsou výsledky nejprve okomentovány na příkladu 6 konkrétních polygonů a po této části pak následuje obecné statistické vyhodnocení. Na obrázku č. 39 je vyobrazeno 6 polygonů, v nichž se vyskytují oba typy hřbetnic. K těmto polygonům jsou v tabulce č. 4 pak uvedeny hodnoty parametrů míry shody.

číslo polygonu	rozdíl počtu bodů	podíl blízkých bodů [%]	průměrná odchylka b. bodů [m]
1	0	100,0	1,9
2	8	81,3	1,4
3	15	60,4	1,3
4	13	10,8	3,0
5	0	75	1,8
6	13	14,6	11,8

**Tab. 4:** Hodnoty parametrů pro vybrané polygony.  
Polygony jsou znázorněny na obrázku č. 39

V případě polygonu 1 nastává nejlepší shoda – obě datové sady mají stejný počet bodů, tzn. rozdíl v počtu bodů je roven 0. Podíl blízkých bodů je 100 %, (tj. maximální možná míra shody), tzn., že každý bod z jedné datové sady má svůj nejbližší bod v druhé sadě, což indikuje vysokou míru tvarové podobnosti obou linií. Průměrná odchylka blízkých bodů je pak 1,9 m, což indikuje i relativně nízkou polohovou odchylku linií. Polygon 2 je také ukázkou velmi vysoké míry shody obou linií, přičemž je zde určitý rozdíl v délce hřbetnic (a tedy počtu bodů) obou datových sad, což vede i k nižší hodnotě podílu blízkých bodů. V případě polygonu 3 je již výraznější rozdíl v počtu bodů, což se projevilo na podílu blízkých bodů, avšak nízká hodnota průměrné odchylky značí dobrou polohovou shodu linií v místech, kde se vyskytovaly obě. Polygon č. 4 je, oproti předchozím, příkladem velmi nízké míry shody – velmi malý podíl blízkých bodů značí nízkou míru tvarové podobnosti. Tento příklad zároveň ukazuje, že hodnoty parametrů je třeba chápat propojeně. Nízká průměrná odchylka u polygonu s nízkým podílem blízkých bodů neznačí vysokou míru shody obou linií v celé jejich délce, ale jen v určitých částech. V případě polygonu č. 6 je míra shody linií také nízká, přičemž zde je oproti polygonu 4 navíc ještě relativně vysoká průměrná odchylka, která značí větší polohový nesoulad obou linií.



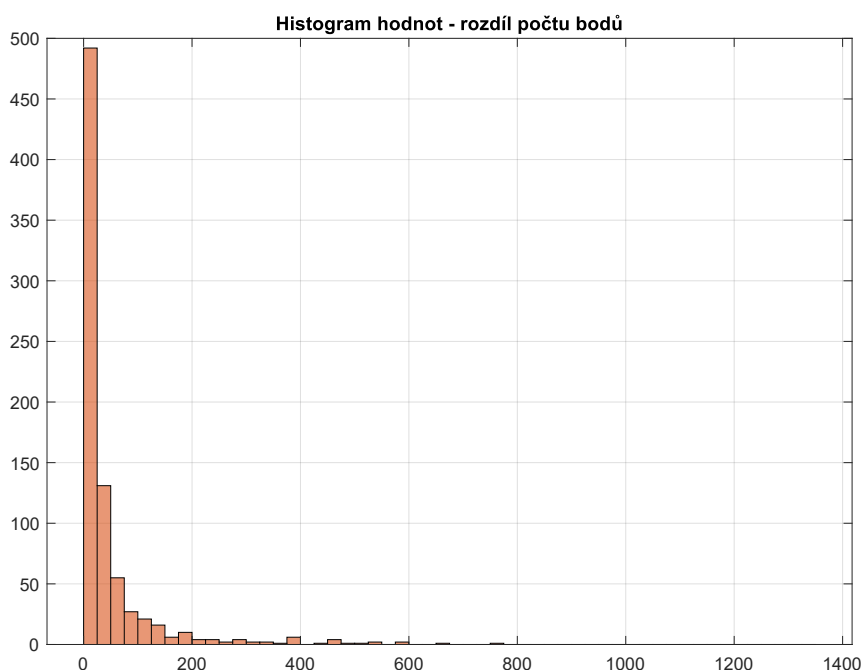
**Obr. 39:** Vybrané polygony s hřbetnicemi.  
Hodnoty parametrů pro vybrané polygony – viz tabulku č. 4

Po výše uvedeném vysvětlení je nyní možné představit výsledky obecného hodnocení míry shody obou datových sad. Níže jsou uvedeny výsledky statistické analýzy, které jsou pak diskutovány, dále analyzovány a srovnávány v kapitole 3.4.4. Následující tabulka (tab. č. 5) obsahuje základní statistiky uvedených parametrů pro polygony v nichž se vyskytují oba typy hřbetnic.

	minimum	maximum	průměr	medián
rozdíl počtu bodů obou datových sad	0	1 365	47,4	15
podíl blízkých bodů [%]	0	100	27,1	22,2
průměrná odchylka blízkých bodů [m]	0,4	681,1	9,1	4,5

**Tab. 5:** Základní statistiky parametrů míru shody na úrovni jednotlivých polygonů pro hřbetnice.

Histogram rozdílu počtu bodů v obou datových sadách je znázorněn na obrázku č. 40.



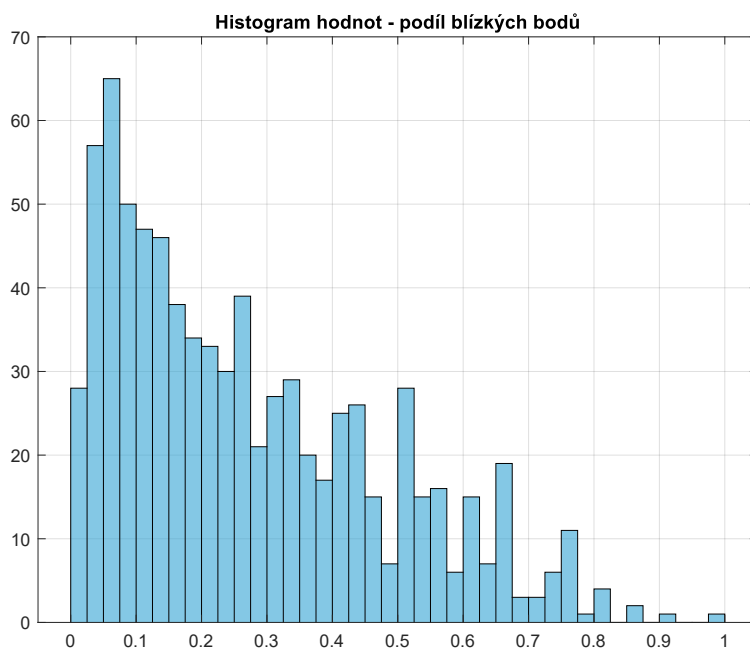
**Obr. 40:** Histogram – rozdíl počtu bodů obou datových sad – hřbetnice.

Parametr vykazuje velké rozpětí hodnot, avšak více než 75 % hodnot je menších než 50 (tj. rozdíl délky hřbetnic je menší 250 m, resp. 125 při 2,5m kroku vzorkování) a zároveň téměř 62 % hodnot je menších než 25 (rozdíl délky menší než 125, resp. 62,5 m). Velmi vysoké hodnoty rozdílu představují spíše odlehlé hodnoty, což dokládá i graf empirické distribuční funkce popisující rozložení hodnot (obr. č. A.1 v příloze práce).

Pro každý polygon s dvojicí hřbetnic byl navíc rozdíl počtu bodů vyjádřen procentuálně vzhledem k délce linií (počtům bodů). Průměrná hodnota procentuálně vyjádřeného rozdílu je 38,6 % a medián 36 %. Co se týče rozložení nízkých hodnot rozdílu, tak v celkem 10 % polygonů je procentuální rozdíl menší než 7,6 % a zároveň ve 20 % polygonů je pak procentuální rozdíl menší než 15,2 % – viz graf empirické distribuční funkce pro procentuální rozdíl na obrázku č. A.2 v příloze práce.

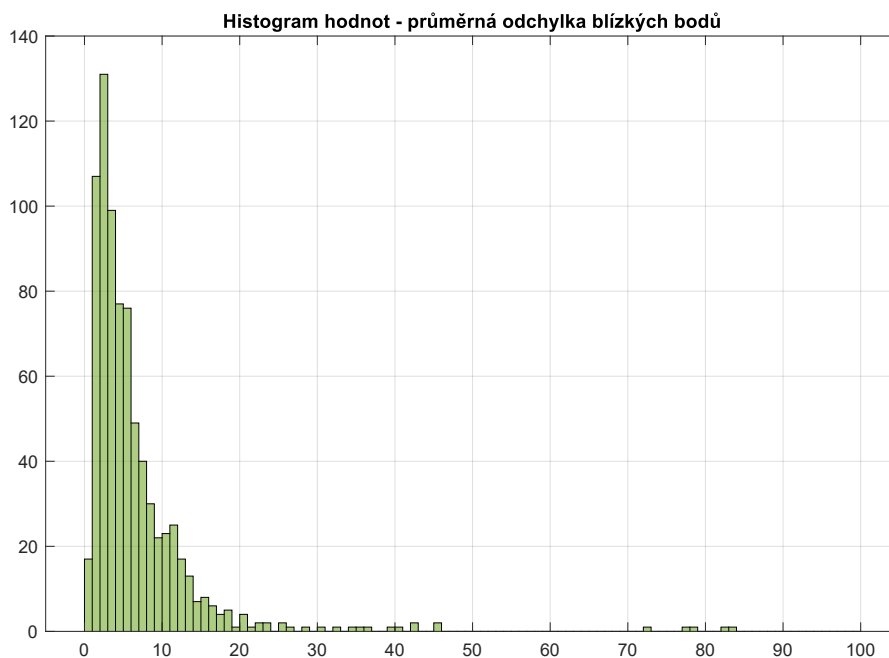
Rozložení hodnot parametru *podíl blízkých bodů* je formou histogramu znázorněno na obrázku č. 41. Hodnoty parametru jsou taktéž rozloženy celkem nerovnoměrně – 90 % všech hodnot je menších než 0,57 (57 %). Pouze ve 2 % případů je hodnota podílu blízkých bodů větší než

0,75 (75 %). Vysoká míra tvarové shody je tedy v datech poměrně vzácná, což má následně vliv i na hodnoty průměrné odchylky blízkých bodů, které jsou relativně vysoké. Podrobnější informace o rozložení jsou znázorněny pomocí empirické distribuční funkce na obrázku č. [A.3](#) v příloze práce.



**Obr. 41:** Histogram – podíl blízkých bodů – hřbetnice.

Posledním využitým byla *průměrná odchylka blízkých bodů*. Rozložení hodnot této charakteristiky je znázorněno na obrázku č. [42](#). Rozložení hodnot je opět poměrně nesymetrické, 90 % všech hodnot je menších než 12,7 m, přičemž 75 % hodnot je menších než 7,9 m. Na obrázku č. [A.4](#) (v příloze práce) je pak empirická distribuční funkce hodnot. Pokud se vyberou pouze polygony, s podílem blízkých bodů větším než 75 %, tak pro tyto polygony je průměrná odchylka rovna 4,1 m (medián 3,7) a pro polygony s podílem blízkých bodů větším než 50 % je pak průměrná odchylka rovna 3,1 m (medián 2,7 m). Z toho vyplývá, že obecně pravděpodobně bude průměrná odchylka klesat s rostoucí tvarovou shodou, jelikož průměrná odchylka pro všechny polygony je 9,1 m, ale zároveň nebude tento vztah platit jednoznačně, jelikož samotná tvarová shoda ještě nutně neznačí vysokou míru polohové shody.



**Obr. 42:** Histogram – průměrná odchylka blízkých bodů – hřbetnice.  
Pro lepší přehlednost byly vykresleny pouze hodnoty 0 – 100, kde se vyskytuje 99 % všech hodnot.

### 3.4.2 Údolnice

Druhá část výsledků se zabývá údolnicemi. Stejně, jako v případě v předchozí kapitoly věnované hřbetnicím, jsou výsledky rozděleny na dvě části – výsledky na úrovni všech polygonů a výsledky na úrovni jednotlivých polygonů.

#### 3.4.2.1 Míra shody na úrovni všech polygonů

V datech za celé území Česka (39 851 polygonů skalních útvarů) je celkem 141 polygonů, v nichž se vyskytují kartografické údolnice, a 18 710 polygonů, ve kterých byly nalezeny referenční údolnice. Následující tabulka (tab. č. 6) obsahuje počty jednotlivých typů polygonů dle existence výskytu dvou typů údolnic.

	kartografické linie		součet řádků
	ano	ne	
referenční linie	132	18 578	18 710
	0,33 %	46,62 %	46,95 %
	9	21 132	21 141
	0,02 %	53,03 %	53,05 %
součet sloupců	141	39 710	39 851
	0,35 %	99,65 %	100,00 %

Tab. 6: Základní rozdělení polygonů dle výskytu typů údolnic.

Největší podíl ze všech polygonů (53,03 % – 21 132) tvoří ty, v nichž se nevyskytuje žádná údolnice. Druhou velkou skupinu polygonů (46,62 % – 18 578) představují polygony, ve kterých byly detekovány pouze referenční údolnice. Nejmenší část polygonů (0,02 % – 9) tvoří polygony, v nichž se vyskytují jen kartografické údolnice. Ve zbývajících polygonech (0,33 % – 132) nastává shoda, tzn. vyskytují se v nich oba typy údolnic.

Co se týče úplnosti kartografických reprezentací údolnic, tak z celkem 141 polygonů, ve kterých se vyskytují kartografické údolnice, se ve 132 z nich vyskytují i údolnice referenční. To znamená, že v 93,6 % polygonů s kartografickou údolnicí je i údolnice referenční, a lze tak očekávat, že tyto polygony údolnici skutečně obsahují. Naopak z 18 710 polygonů s referenční údolnicí je pouze 132 (0,7 %) takových, že obsahují zároveň i kartografickou údolnici. Je tak možné, že kartografická reprezentace těchto polygonů nemusí být 100% spolehlivá.

### 3.4.2.2 Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů

Detailnější analýza míry shody byla provedena pouze pro polygony, ve kterých se vyskytují oba typy údolnic, tj. ve 132 polygonech. Dále uvedené údaje a procentuální hodnoty se tak vztahují k této hodnotě. K hodnocení byly využity 3 stejné charakteristiky jako v případě hřbetnic. Základní statistiky použitých parametrů jsou uvedeny v tabulce č. 7.

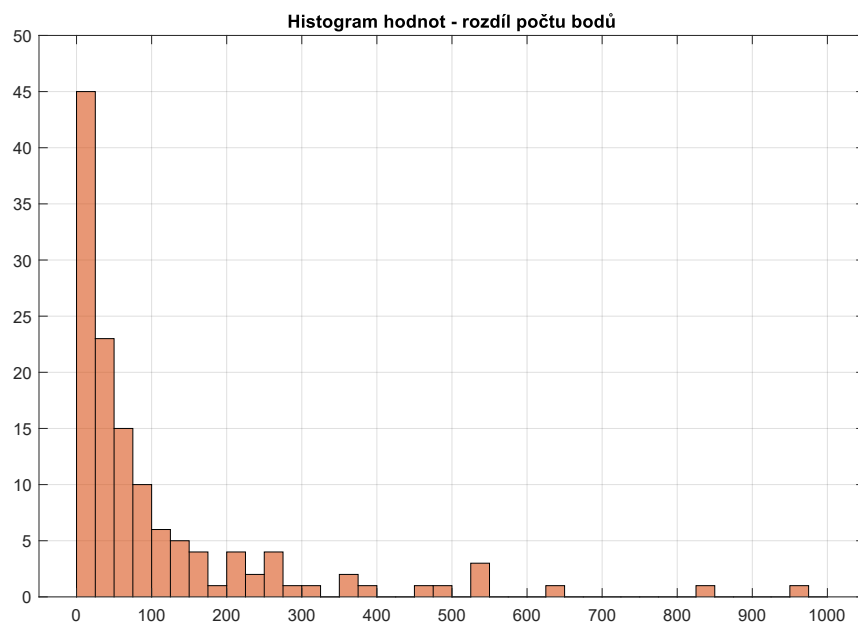
	minimum	maximum	průměr	medián
rozdíl počtu bodů obou datových sad	1	956	108,2	45
podíl blízkých bodů [%]	0,3	88,0	10,8	6,2
průměrná odchylka blízkých bodů [m]	0,8	98,4	12,4	7,0

**Tab. 7:** Základní statistiky parametrů určujících míru shody na úrovni jednotlivých polygonů pro údolnice.

*Rozdíl počtu bodů*, jakožto nejjednodušší míra shody, vykazuje stejně jako v případě hřbetnic velké rozpětí hodnot, jejichž rozložení je poměrně nesymetrické. 50 % hodnot je menších než 45 (tj. rozdíl délky menší přibližně než 225 m, resp. než 112,5 m) a zároveň 25 % hodnot je menších než 16 (tzn. rozdíl délky přibližně menší než 80, resp. 40 m). Rozložení hodnot je znázorněno pomocí histogramu (obr. č. 43) a empirické distribuční funkce (obr. č. A.5 v příloze práce).

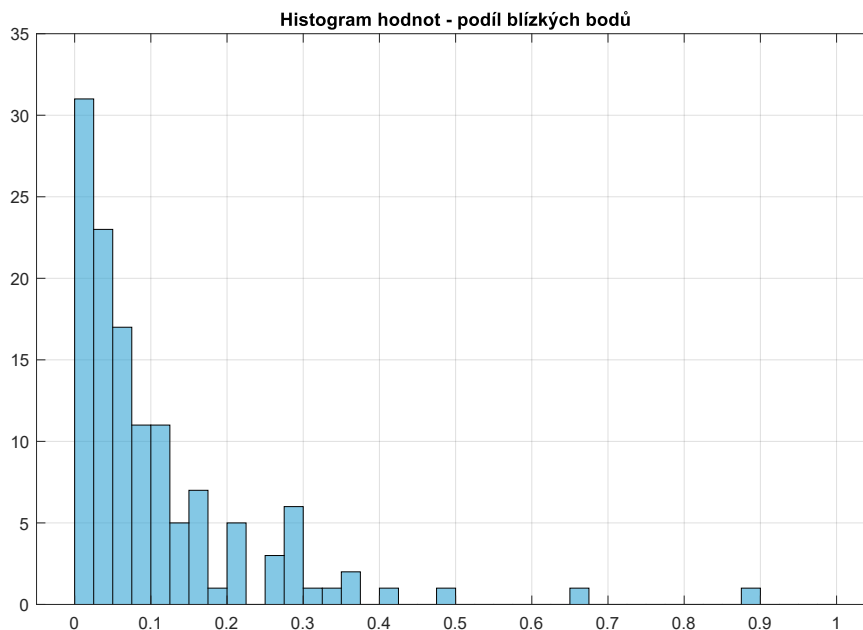
Rozdíl byl následně vyjádřen v procentech vzhledem k délce obou linií. Průměrná hodnota procentuálního rozdílu je 60,2 % a medián pak 60,5 %. Co se týče rozložení hodnot, tak ve 25 % polygonů je rozdíl menší než 46,1 % a zároveň pouze v 10 % je rozdíl menší než 30,5 %. Polygonů, kde je rozdíl menší než 15 % je 5 %. Rozložení hodnot procentuálního rozdílu je znázorněno na obrázku č. A.6 (v příloze práce).

V datech převládají relativně vysoké hodnoty rozdílu (jak absolutní, tak procentuální), což znamená, že délková shoda dvojic údolnic je v datech spíše vzácná, což má za následek i nízké hodnoty podílu blízkých bodů a vysoké hodnoty průměrné odchylky blízkých bodů.



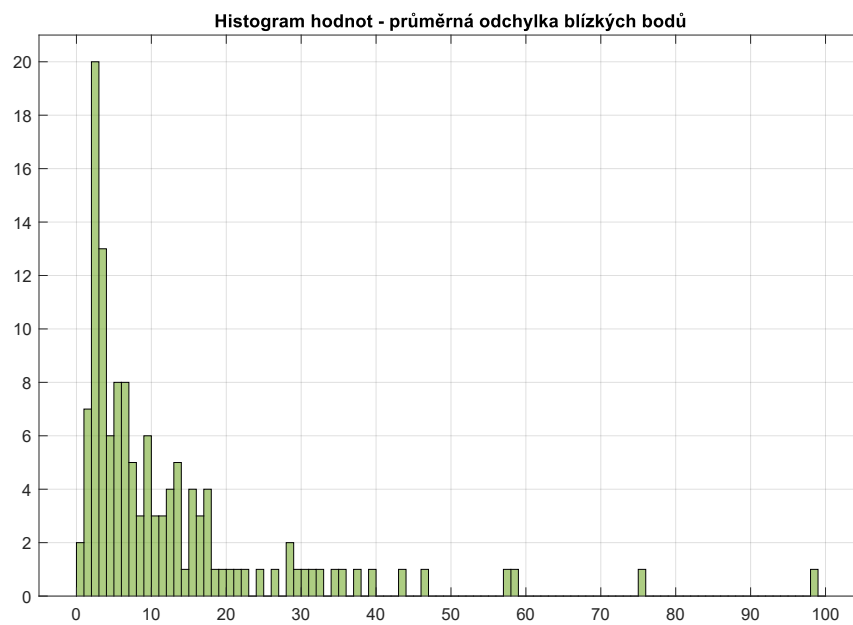
**Obr. 43:** Histogram – rozdíl počtu bodů obou datových sad – údolnice.

Co se týče tvarové podobnosti reprezentované parametrem *podíl blízkých bodů*, tak celkem v 90 % polygonů s oběma typy údolnic je podíl blízkých bodů menší než 28 %. Pouze ve 2 % polygonů je shoda větší než 50 % a jen v 1 % polygonů je podíl blízkých bodů větší než 70 %. Rozložení hodnot je podrobněji znázorněno pomocí histogramu a grafu empirické distribuční funkce na obrázcích č. 44 a A.7 (v příloze práce). Vysoká míra tvarové shody je v datech velmi vzácná, což je dáno velkými rozdíly v délkách dvojic údolnic a zároveň to má za následek i relativně vysoké hodnoty odchylek blízkých bodů.



Obr. 44: Histogram – podíl blízkých bodů – údolnice.

Pro polohovou podobnost dvojic linií danou parametrem *průměrná odchylka blízkých bodů* platí, že rozložení hodnot je nesymetrické, polovina hodnot je menších než 7 m a ve 25 % polygonů je odchylka menší než 3,4 m. Rozložení hodnot je vyobrazeno pomocí histogramu na obrázku č. 45 a empirické distribuční funkce na obrázku č. A.8 (v příloze práce). V případě výběru polygonů, v nichž je podíl blízkých bodů větší než alespoň 20 % se průměrná odchylka rovná 11,4 m (medián 4,1 m), což naznačuje, že lze očekávat nižší hodnoty odchylky při vyšší míře tvarové shody, avšak v případě údolnic je vyšší míra tvarové shody velmi vzácná a nelze to tak říci s jistotou.



**Obr. 45:** Histogram – průměrná odchylka blízkých bodů – údolnice.

### 3.4.3 Lomové hrany

Náplní třetí části výsledků jsou výsledky týkající se lomových hran. Stejně jako v přechozích dvou kapitolách jsou výsledky rozděleny do dvou částí.

#### 3.4.3.1 Míra shody na úrovni všech polygonů

Kartografické lomové hrany se nacházejí v celkem 4 932 polygonech skalních útvarů. Polygonů, ve kterých se vyskytují referenční lomové hrany je pak 18 923. Jako první jsou polygony skalních útvarů rozděleny do 4 skupin dle výskytu obou typů lomových hran, přičemž toto rozdělení je uvedeno v tabulce č. 8.

	kartografické linie		součet řádků
	ano	ne	
referenční linie	3 738 9,4 %	15 185 38,1 %	18 923 47,5 %
	1 194 3,0 %	19 734 49,5 %	20 928 52,5 %
součet sloupců	4 932 12,4 %	34 919 87,6 %	39 851 100,0 %

Tab. 8: Základní rozdělení polygonů dle výskytu typů lomových hran.

V téměř polovině polygonů (49,5 % – 19 734) se nevyskytuje žádný typ lomové hrany. V 38,1 % polygonů (15 185) se vyskytují pouze referenční lomové hrany. Nejmenší podíl polygonů představují ty, v nichž se vyskytují pouze kartografické lomové hrany (3 % – 1 194). Zbývající část (9,4 % – 3 738) zahrnuje polygony, ve kterých se nachází oba typy lomových hran.

Kartografické lomové hrany se vyskytují v celkem 4 932 polygonech skalních útvarů, přičemž v 3 738 z nich, se vyskytují zároveň i lomové hrany referenční. Tedy v 75,8 % polygonů s kartografickými lomovými hranami nalezneme i referenční lomové hrany, což znamená, že tyto polygony pravděpodobně skutečně obsahují určitou lomovou hranu. Z opačného pohledu – z celkového počtu polygonů, v nichž byly detekovány referenční lomové hrany (18 923), je 3 738 takových, že jsou v nich i kartografické lomové hrany. To tedy znamená, že v necelé pětině polygonů s referenčními lomovými hranami (19,8 %) nalezneme i lomové hrany kartografické, přičemž zbylé polygony (s referenčními liniemi, ale bez kartografických linií) pak mohou představovat potenciálně problematické polygony, co se týče úplnosti kartografické kresby.

### 3.4.3.2 Míra shody na úrovni jednotlivých polygonů

Druhá část výsledků analýzy lomových hran je zaměřena na míru shody na úrovni jednotlivých polygonů. Toto Detailnější hodnocení míry shody je provedeno pouze pro polygony, v nichž se nachází oba typy lomových hran, tj. pro 3 738 polygonů. V následujícím textu uvedené hodnoty (primárně ty procentuální) se tedy vztahují k těmto polygonům, nikoliv ke všem polygonům skalních útvarů.

Jako první jsou v tabulce č. 9 uvedeny souhrnné statistiky jednotlivých parametrů, které byly využity k hodnocení míry shody.

	minimum	maximum	průměr	medián
rozdíl počtu bodů obou datových sad	0	938	38,9	16
podíl blízkých bodů [%]	0,3	100	17,0	13,3
průměrná odchylka blízkých bodů [m]	0,1	665,4	11,1	6,0

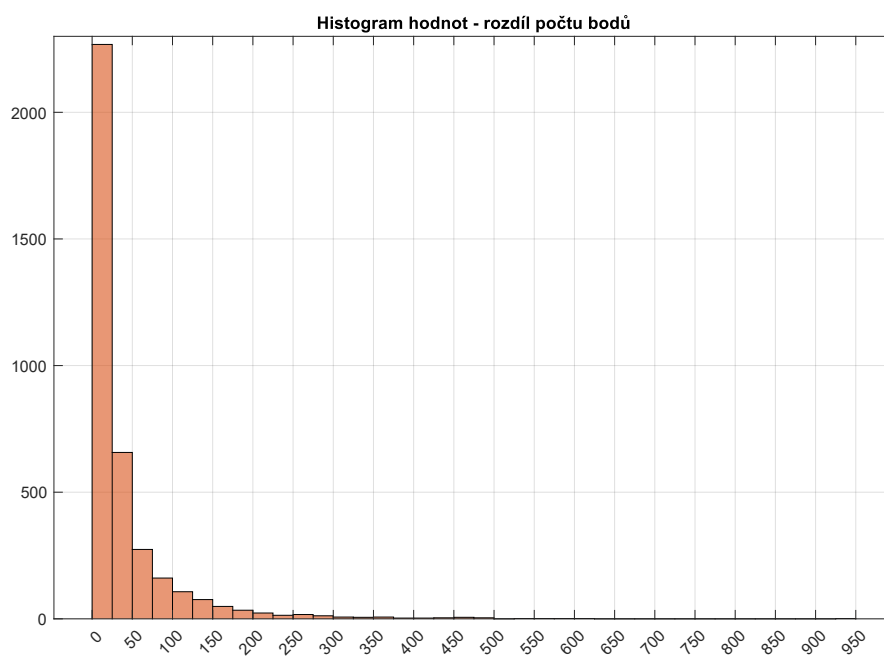
Tab. 9: Základní statistiky parametrů určujících míru shody na úrovni jednotlivých polygonů pro lomové hrany.

Prvním kritériem pro hodnocení shody byl *rozdíl počtu bodů*. Stejně, jako v případě hřbetnic a údolnic, mají hodnoty rozdílu velké rozpětí a jejich rozložení je poměrně nesymetrické. Celkem v 75 % polygonů je rozdíl počtu bodů menší než 43 (tj. přibližně menší než 215 m, resp. 107,5 m). Zároveň v 50 % případů rozdíl nepřekročil 16 (tedy 80, resp. 40 m) a v 25 % případů rozdíl nepřesáhl 6 (tj. 30, resp. 15 m). Rozložení hodnot rozdílu pro lomové hrany je znázorněno na obrázcích č. 46 a A.9 (v příloze práce) pomocí histogramu a grafu empirické distribuční funkce.

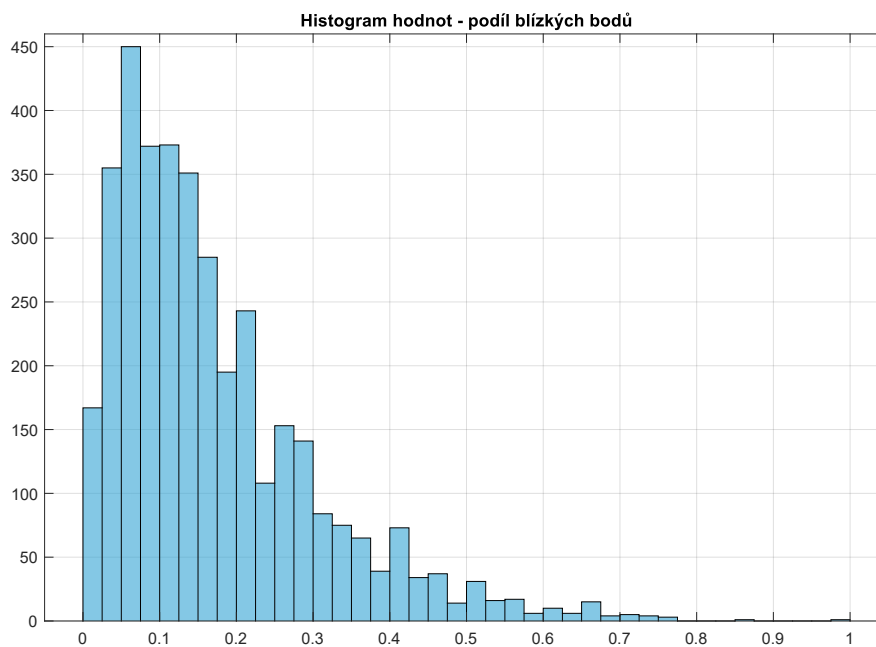
Rozdíl byl také vyjádřen procentuálně vzhledem k délce obou linií. Průměrná hodnota procentuálního rozdílu je 46,2 % délky linií a medián je 41,3 %. Ve čtvrtině polygonů se linie liší o méně než 20 % délky a zároveň v 10 % případů nepřesáhl rozdíl 8 %. Rozložení hodnot procentuálního rozdílu je popsáno prostřednictvím empirické distribuční funkce na obrázku č. A.10 (v příloze práce).

Parametr popisující tvarovou podobnost – *podíl blízkých bodů* dosahuje převážně spíše nižších hodnot – v celkem 75 % polygonů je podíl blízkých bodů nižší než 23 % a zároveň pouze ve 3 % případů je podíl vyšší než 50 %. Histogram hodnot a empirická distribuční funkce jsou uvedeny na obrázcích č. 47 a A.11 (v příloze práce). Z uvedeného vyplývá, že vyšší míra tvarové podobnosti je v datech spíše ojedinělá, což je částečně dáno velkými rozdíly v délkách dvojic linií a zároveň to má za následek relativně vysoké hodnoty průměrné odchylky blízkých bodů.

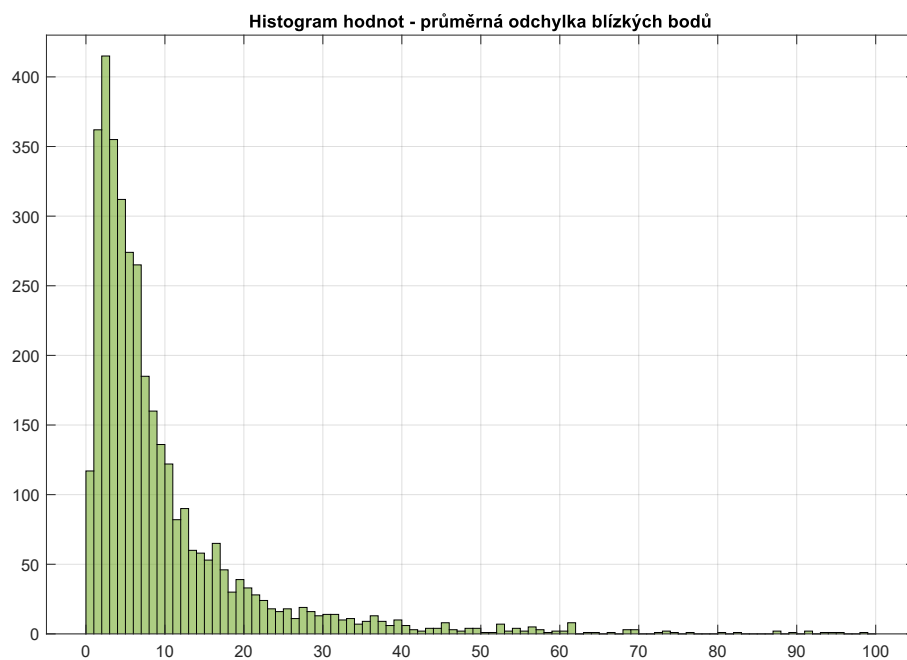
*Průměrná odchylka blízkých bodů*, jakožto míra polohové podobnosti linií, má také poměrně velké rozpětí a v maximálních hodnotách dosahuje relativně extrémních hodnot (až 665 m). Z hlediska rozložení hodnot – 90 % všech hodnot je menších než 23 m a zároveň ve 25 % polygonů je hodnota menší než 3 m. Rozložení hodnot je podrobněji znázorněno na histogramu (obr. č. 48) a na grafu empirické distribuční funkce (obr. č. A.12 v příloze práce). Co se týče vztahu mezi podílem blízkých a průměrnou odchylkou, tak pro všechny dvojice lomových hran je průměrná odchylka rovna 11,1 m (medián 6,0 m), přičemž pro polygony s podílem blízkých bodů větším než 50 % je průměrná odchylka mírně nižší, a to 8,3 m (medián 3,2 m).



**Obr. 46:** Histogram – rozdíl počtu bodů obou datových sad – lomové hrany.



**Obr. 47:** Histogram – podíl blízkých bodů – lomové hrany.



**Obr. 48:** Histogram – průměrná odchylka blízkých bodů – lomové hrany.  
Pro lepší přehlednost vykreslena část dat obsahující 99 % nejmenších hodnot.

### 3.4.4 Celkové výsledky

V předešlých podkapitolách byly postupně představeny výsledky analýzy ČTK dle jednotlivých typů linií. Cílem této poslední části výsledků je shrnout zásadní výsledky, porovnat jednotlivé typy ČTK mezi sebou a doplnit vybrané, zatím neuvedené informace.

Jedním z cílů analýz bylo zhodnotit, do jaké míry kartografické reprezentace odpovídají „realitě“, která je v tomto případě reprezentována DMR 5G, resp. liniemi z něj odvozenými. Míra shody byla hodnocena na dvou úrovních, tj. na úrovni všech polygonů a na úrovni jednotlivých polygonů. Co se týče míry shody na úrovni všech polygonů, tak tu lze hodnotit na základě počtu jednotlivých typů polygonů, rozdělených dle toho, jaký typ linií obsahují (resp. neobsahují).

Z hlediska hodnocení kartografických linií jsou pak zásadní tyto údaje:

- Počet polygonů, ve kterých se nachází kartografická linie.
- Počet polygonů, v nichž se vyskytují zároveň kartografické i referenční linie (nastává shoda).
- Počet polygonů, v nichž byla detekována pouze referenční linie.

Tyto údaje pro jednotlivé typy ČTK jsou uvedeny v následující tabulce (tab. č. 10).

	hřbetnice	údolnice	lomová hrana
počet polygonů s kartografickou linií	915	141	4 932
počet polygonů se shodou	797	132	3 738
podíl polygonů se shodou vzhledem k počtu polygonů s kart. linií	87,1 %	93,6 %	75,6 %
počet polygonů s referenční linií	20 195	18 710	18 923
podíl polygonů se shodou vzhledem k počtu polygonů s ref. linií	3,9 %	0,7 %	19,8 %

**Tab. 10:** Vybrané statistické údaje – výstupy analýz dvojic ČTK.

Pro kartografické linie z uvedených hodnot vyplývá, že v největším množství polygonů se vyskytují lomové hrany, poté hřbetnice a nejméně je polygonů s údolnicemi. V případě referenčních linií je nejvíce polygonů s hřbetnicemi, pak s lomovými hrany a nejmenší množství je polygonů s údolnicemi. Podíl polygonů, kde nastává shoda vůči polygonům s kartografickými liniemi nese určitou informaci o úplnosti kartografické kresby, resp. jej lze chápat jako určitý ukazatel „správnosti“ kartografických reprezentací. Na základě tohoto podílu dosahují nejlepších výsledků údolnice, následně hřbetnice a nejmenší hodnotu mají lomové hrany.

Nejhorší výsledek lomových hran je poměrně očekávatelný – nalézají se největším množství polygonů, přičemž často se jedná o krátké a osamocené segmenty, které nepředstavují významné terénní hrany. Zároveň lze horší výsledek lomových hran vysvětlit, tím, že při tvorbě kartografických reprezentací jsou v některých případech využity pro grafické vyplnění polygonu (více řad horních symbolů nad sebou), aniž by se v objektu reálně vyskytovaly. Nejlepší výsledek údolnic může být částečně dán tím, že se jedná o nejméně častou kartografickou linii, a tak pokud se již někde zakreslena, tak se na daném místě pravděpodobně údolnice skutečně vyskytuje.

Z hlediska tvarové podobnosti dosahují nejlepších výsledků hřbetnice, jejichž průměrný podíl blízkých bodů je roven 27,1 %. Nejhorších výsledků z pohledu tvarové podobnosti pak dosahují údolnice s průměrnou hodnotou podílu blízkých bodů pouze 10,8 %. U lomových hran je průměrný podíl blízkých bodů roven 17,0 %. U všech typů ČTK je vyšší míra tvarové podobnosti spíše vzácná, ale i přesto jsou mezi jednotlivými liniemi z hlediska tvarové podobnosti rozdíly. Co se týče polohové shody dvojic linií, jsou výsledky stejné, tzn. nejnižší průměrné odchylky blízkých bodů dosahují hřbetnice (9,1 m), největší průměrnou odchylku mají údolnice (12,4 m) a lomové hrany dosahují v průměru odchylky blízkých bodů 11,1 m.

Uvedené výsledky na základě tvarové a polohové míry shody jsou částečně v rozporu s výše uvedeným hodnocením zaměřeným na správnost, resp. úplnost kartografické kresby. Kartografické údolnice dosahují z pohledu úplnosti kartografické kresby nejlepších výsledků, avšak výsledky založené na míře tvarové a polohové shody jsou naopak nejhorší. To lze chápat tak, že kartografické údolnice jsou zakresleny ve správných polygonech (resp., že v polygonech, kde jsou zakresleny se vyskytuje i referenční údolnice), avšak jejich zakreslení z hlediska tvaru a polohy „realitě“ odpovídá jen málo. V případě hřbetnic je úplnost (resp. správnost) kartografické kresby horší než u údolnic, ale hodnocení z hlediska tvarové a polohové míry shody je v případě hřbetnic lepší. Tedy kartografické hřbetnice jsou oproti údolnicím v mírně větším počtu případů zakresleny v nesprávném polygonu (tj. v polygonu bez odpovídající referenční hřbetnice). Ale jejich kresba v polygonech s příslušnou referenční linií je tvarově a polohově mírně lepší než u údolnic. Toto může být způsobeno tím, že vymezení průběhu hřbetnice je v rámci kartografické reprezentace více jednoznačné než u údolnice, což je dáno způsobem, kterým jsou tyto linie v datech reprezentovány (viz kapitolu 2.2).

Lomové hrany dosahují nejhoršího hodnocení z pohledu úplnosti (správnosti) kartografické kresby a na základě tvarové a polohové míry shody dopadly hůře než hřbetnice, ale lépe než údolnice.

Z uvedené tabulky, resp. z počtů polygonů, v nichž se vyskytují jednotlivé typy referenčních linií je navíc zřejmé, že existují polygony, ve kterých byl detekován více než jeden typ referenčních linií. Stejně situace (jen v menší míře) nastávají i u kartografických linií. V tabulce č. 11 jsou uvedeny počty těchto jednotlivých situací pro kartografické linie.

Kartografické linie					
	hřbetnice	údolnice	lomová hrana	všechny ČTK zároveň	celkem
hřbetnice	385 (6,53 %)	1 (0,02 %)	484 (8,21 %)		915
údolnice	1 (0,02 %)	61 (1,03 %)	34 (0,58 %)	45 (0,76 %)	141
lomová hrana	484 (8,21 %)	34 (0,58 %)	4 369 (74,08 %)		4932
celkem polygonů s kartografickou linií					5 898*

**Tab. 11:** Počty polygonů, ve kterých se nachází více typů kartografických linií zároveň.

\* Tato hodnota odpovídá počtu polygonů, ve kterých se vyskytuje určitý typ kartografické linie a vztahují se k ní procentuální hodnoty. Součty jednotlivých řádků odpovídají počtu všech polygonů, ve kterých je daný typ hrany (včetně polygonů, kde je hran více). Hodnota označená \* tak není přímo součtem řádkových součtů.

Na diagonále uvedené tabulky jsou počty polygonů, v nichž se vyskytuje pouze 1 daný typ hrany, přičemž ve zbylých polích jsou již počty situací, kdy se v polygonu nachází více různých kartografických linií. Poměrně ve velkém množství polygonů se nachází hřbetnice spolu s lomovými hranami, přičemž tento jev u kartografických linií celkem přirozený a je dán procesem, kterým byly oba typy linií z kartografických reprezentací odvozeny. Nejméně je polygonů,

v nichž se nachází zároveň kartografická hřbetnice i údolnice, což je očekávatelné, jelikož se jedná o úplně odlišné typy hran. Celkem v 45 polygonech se pak vyskytují všechny tři typy hran zároveň, přičemž se jedná ve většině případů o velmi rozsáhlé a komplexní polygony.

U referenčních linií dochází ke stejným situacím. Počty jednotlivých případů jsou zachyceny v tabulce č. 12.

referenční linie					
	hřbetnice	údolnice	lomová hrana	všechny ČTK zároveň	celkem
hřbetnice	2 485 (8,05 %)	1 972 (6,39 %)	2 250 (7,29 %)	13 488 (43,72 %)	20 195
údolnice	1 972 (6,39 %)	1 381 (4,48 %)	1 869 (6,06 %)		18 710
lomová hrana	2 250 (7,29 %)	1 869 (6,06 %)	1 316 (4,27 %)		18 923
celkem polygonů s referenční linií					30 852*

**Tab. 12:** Počty polygonů, ve kterých se nachází více typů referenčních linií zároveň.

\* Tato hodnota odpovídá počtu polygonů, ve kterých se vyskytuje určitý typ referenční linie a vztahují se k ní procentuální hodnoty. Součty jednotlivých řádků odpovídají počtu všech polygonů, ve kterých je daný typ hrany (včetně polygonů, kde je hran více). Hodnota označená \* tak není přímo součtem řádkových součtů.

Z uvedených hodnot je zřejmé, že v případě referenčních linií nastává situací, kdy je v jednom polygonu detekováno více typů hran, výrazně více a jejich rozložení není tak zřejmé, jako v případě linií kartografických. Případy, kdy se v polygonu vyskytuje hřbetnice/údolnice a lomová hrana, nejsou úplně neočekávatelné, jelikož lomové hrany lze považovat za speciální případy hřbetnic a údolnic. Zajímavé je poměrně velké množství situací, kdy se v jednom polygonu vyskytuje hřbetnice i údolnice. To může být způsobeno tím, že referenční linie vznikly na základě velmi detailního DMR 5G, a tak mohou reprezentovat i takové hrany, které kartografické reprezentace nezachycují, což má za následek větší množství těchto případů.

Dalo by se očekávat, že procentuální zastoupení polygonů v tabulkách č. 11 a 12 budou podobná, ale není tomu tak. Uvedené hodnoty spíše naznačují, že dochází pravděpodobně k nadměrnému užívání lomových hran, což může souviset s jejich využitím ke grafickému vyplňování plochy velkých polygonů. Naopak údolnice jsou pravděpodobně užívány méně, než by měly být, k čemuž může přispívat i to, že zachycení údolnice může být v některých případech komplikovanější než například v případě hřbetnic (čemuž odpovídá i složitější způsob detekce údolnic z dat kartografických reprezentací – viz kapitolu 2.2).

## 4 Diskuze

Diskuze je rozdělena na dvě části, přičemž první část je věnována souhrnným výsledkům a diskuzi limitů a variant použitých postupů. Druhá část je zaměřena primárně na podrobnější diskuzi výsledků z různých pohledů.

K odvození referenčních linií byla využita metoda publikovaná Jarošem (2011), která je založená na konstruování a analýze příčných profilů nad digitálním modelem terénu. Metoda byla zvolena na základě dobrých výsledků nad testovacími daty a druhým podstatným důvodem pro její volbu byla dostupnost podrobné dokumentace a detailních zdrojových kódů (na rozdíl od ostatních metod). Dostupnost zdrojových kódů byla zásadní s ohledem na to, že pro takto specifická data, kterými skalní útvary jsou, bylo třeba metodu určitým způsobem modifikovat, což dostupnost kódů umožnila, resp. výrazně zjednodušila.

Metodu pro detekci ČTK bylo oproti její původní verzi třeba modifikovat s ohledem na velmi specifická data, což vedlo k získání informací o průběhu tří typů terénních hran v bezmála 40 tisících objektů. Samotné zpracování takového množství dat je poměrně náročné a časová náročnost výpočtů se pohybovala v řádu dnů až týdnů. Postup, kterým byl průběh referenčních terénních hran odvozen, je samozřejmě zásadní a jednotlivé jeho kroky, resp. i samotná volba metody mají vliv na výsledek a následné finální zhodnocení shody s kartografickými liniemi. Co se týče volby metody detekce ČTK, tak každá metoda má svá specifika a její volba zásadním způsobem ovlivňuje výsledek, avšak pro účely předkládané práce nebyla volba metody až tak zásadní. A to z toho důvodu, že hlavním cílem bylo provést porovnání dvojic ČTK, nikoliv získat dokonalou reprezentaci terénních hran. Druhým důvodem, proč není volba metody až tak podstatná, je skutečnost, že kartografické linie vznikly z dat kartografických reprezentací určitým postupem, který byl poměrně komplikovaný a zahrnoval celou řadu kroků, které mohly negativně ovlivnit výsledek, a tak nelze kartografické linie považovat za 100% správnou reprezentaci terénních hran nakreslených kartografy podle starých map.

Proces, kterým byly odvozeny referenční terénní hrany zahrnoval velké množství dílčích kroků a byl poměrně komplikovaný. Je zřejmé, že jednotlivé kroky mohly významným způsobem ovlivnit výsledek. Na začátku procesu byly procházeny rastry DMR 5G v okolí skal a byly v nich hledány pixely, které by mohly potenciálně reprezentovat části daných typů hran. Daný výřez DMR 5G byl analyzován po jednotlivých příčných profilech, přičemž každý příčný profil byl generalizován a následně v něm byly hledány pixely terénních hran. Míra generalizace byla zvolena na základě vzorku testovacích dat, přičemž je otázkou, jestli byl jiná volba vedla k výrazně odlišným výsledkům.

K nalezení pixelů odpovídajících částem terénních hran byl pro každý typ ČTK vytvořen koe-

ficient, který měl ideálně charakterizovat míru významnosti dané terénní hrany. Vytvořené koeficienty zahrnují vybrané parametry terénních hran, na základě kterých přiřazují jednotlivým pixelům hodnoty míry významnosti. Problematické zde může být, že lomové hrany lze určitým způsobem považovat za speciální případy hřbetnic a údolnic, což znamená, že při procesu detekce bylo nutné stanovit určité prahové hodnoty, které odlišily lomové hrany od hřbetnic, resp. údolnic. Jednalo se parametry mezní sklon roviny a minimální sklon svahu (viz kapitolu [3.2.4.4](#)), na základě jejichž hodnot byly hrany odlišeny, přičemž volba hodnot mohla mít vliv na počty jednotlivých pixelů náležících daným typům ČTK, resp. i na počty jednotlivých typů hran.

Další postup byl založen na zpracování rastrů s hodnotami zmíněných koeficientů významnosti, což zahrnovalo zjednodušeně získání vektorové reprezentace ČTK ze spojitých rastrů s hodnotami míry významnosti jednotlivých typů hran. K dosažení uvedeného bylo třeba spojitý rastr prvně převést na binární, tzn. rozhodnout které hodnoty jednotlivých koeficientů budou považovány za významné a které nikoliv. Prahové hodnoty pro toto rozhodnutí byly voleny zvoleny relativně vzhledem k hodnotám koeficientů, což zajistilo lokální adaptaci pro polygony skalních útvarů. Volba prahových hodnot je tak dalším možným problematickým místem, jelikož volba prahů má vliv na množství, velikost i tvar detekovaných linií a jejich volba proběhla pomocí testovací sady dat. Následně byly binární rastry zpracovány s cílem získat co nejvíce spojitých tvarů liniového charakteru, ze kterých byly dále odvozeny vektorové reprezentace ČTK. Vzniklé vektorové reprezentace hran byly v posledním kroku generalizovány, což byl nutný krok vzhledem k tomu, že linie byly vektorizovány s využitím Thiessenových polygonů, jejichž nežádoucí pozůstatky bylo třeba potlačit, resp. odstranit.

Z výše uvedeného vyplývá, že proces získání referenčních linií zahrnuje celou řadu kroků, které mohly ovlivnit výsledek. Ať už se jedná míru generalizace příčných profilů z DMR 5G, tvorbu koeficientů míry významnosti terénních hran, odlišení lomových hran, volbu prahových hodnot pro vytvoření binárního rastru nebo o vektorizaci a generalizaci vzniklých ČTK. Na základě vlastností referenčních a kartografických linií byly pro účely porovnání linie převedeny na bodovou reprezentaci. To bylo provedeno s ohledem na vlastnosti obou datových sad, resp. proto, že obě datové sady mají pouze určitou přesnost danou způsobem jejich odvození a jsou zatíženy určitým množstvím nejistoty. „Hrubší“ (generalizované) porovnání bylo tak zvoleno jako nejvhodnější způsob.

Z provedené analýzy kartografických a referenčních linií vyplývá, že terénní hrany zachycené kartografickými reprezentacemi jsou ve většině případů relativně v pořádku, tedy pokud je hrana v kartografické reprezentaci, s velkou pravděpodobností se objevila i v referenčních datech. Nejlepšího výsledku dosahují údolnice, pro které platí, že ze všech polygonů, ve kterých se vyskytuje kartografická údolnice (141) se v 93,6 % vyskytuje i údolnice referenční. Na druhém místě jsou hřbetnice, kde celkem v 87,1 % polygonů s kartografickou hřbetnicí (915) je i hřbetnice referenční. Nejhoršího výsledku pak dosáhly lomové hrany, kde je podíl polygonů s oběma liniemi vzhledem k počtu polygonů s kartografickými liniemi (4 932) jen 75,6 %.

Z výsledků lze tak odvodit, že kartografické lomové hrany odpovídají „realitě“ ze všech typů linií nejméně. To může být částečně dáno tím, že jsou v některých případech zakreslovány s účelem graficky vyplnit plochu polygonů (více řad horních symbolů nad sebou – viz obr. č. [49](#)), což potvrzuje i relativně velký počet polygonů s lomovými hranami oproti zbylým hranám.



**Obr. 49:** Ukázka skalního útvaru s lomovými hranami využitými primárně pro grafické vyplnění plochy polygonu. Pro názornost doplněn podélný profil skalním útvarem – stopa profilu znázorněna modrou linií.  
Výřez z digitální verze ZM 10.

Zdroj: ©ČÚZK, 2022, podélný profil: vlastní výpočet nad výřezem DMR 5G

Pro porovnání liniových dat (převedených na bodovou reprezentaci) byla vytvořena vlastní metodika zahrnující tři hlavní kritéria: délkovou podobnost linií, tvarovou podobnost a polohovou podobnost. Důvodem pro vytvoření vlastní metodiky pro hodnocení míry shody je skutečnost, že existující metody pro porovnání liniových objektů očekávají na vstupu data, u nichž bude shoda spíše větší a metody tak hodnotí detailně například polohovou přesnost. U analyzovaných dat byla však situace spíše opačná a očekávala se nižší míra shody, což dokládají i výsledky. Na základě výsledků tvarové podobnosti reprezentované parametrem podíl blízkých bodů pak nejlépe vycházejí hřbetnice, kde je průměrná hodnota podílu blízkých bodů 27,1 %. Lomové hrany dosahují průměrné hodnoty 17 % a údolnice pak pouze 10,8 %.

Co se týče tvarové míry podobnosti, tak platí, že u větších a komplexnějších polygonů je nižší míra shody než u polygonů menších (a případně jednodušších). Uvedené platí pro všechny tři typy hran. Například pokud se vyberou polygony s oběma typy hřbetnic s plochou větší než 50 000 m<sup>2</sup>, tak pro ně platí, že průměrný podíl blízkých bodů je pouze 2,4 %, avšak průměrná tvarová shoda všech polygonů s oběma typy hřbetnic je 27,1 %. Zároveň také platí, že polygony s oběma typy hřbetnic s rozlohou menší 5000 m<sup>2</sup> mají průměrný podíl blízkých bodů 36,1 %. Toto zjištění je poměrně očekávatelné a odpovídá závěrům autorovy bakalářské práce (Kyncl 2020). Komplexní a velké polygony se totiž vyskytují převážně v oblastech pískovcových skalních měst, kde je terén velmi členitý a jeho optimální kartografické zachycení je poměrně problematické. V rámci tak členitého terénu, kde se na malé ploše vyskytuje velké množství skalních útvarů, není vždy možné z důvodu nedostatku místa zakreslit jednotlivé skalní útvary a kresba tak charakterizuje spíše celkový charakter většího počtu skalních útvarů, z čehož může plynout nesoulad mezi daty odvozenými z DMR 5G a kartografickou kresbou. Uvedené dokládá, že kartografická reprezentace ČTK je relativně v pořádku, přičemž „správnost“ se liší podle typu hrany. Zároveň ale platí, že v naprosté většině polygonů se kartografické hrany nevyskytují, ač byly z DMR 5G odvozeny. To je dáno pravděpodobně

generalizací už při původní kresbě skalních útvarů převzatých z TM 10 do ZM 10 a umocněno dalším zjednodušením při přechodu na digitální tvorbu. Dalším možným vysvětlením velmi malého množství polygonů s kartografickými liniemi by mohla být generalizace linií z hlediska délky – tzn., že by byly reprezentovány jen terénní hrany o určité velikosti. Avšak v porovnání délek linií v obou sadách není žádný statisticky významný rozdíl, tzn., že generalizace byla pravděpodobně ovlivněna složitějšími prostorovými vztahy, jako například vzájemná poloha linií, poloha linií a okraje polygonu. Tyto situace pak v některých případech není možné prostředky používanými pro znázorňování skal zachytit, protože bodové symboly používané pro kresbu horní hrany skály jsou (měřeno kolmo k linii) příliš široké.

Dalším možnou příčinou poměrně nízké celkové míry shody by mohly být polygony obsahující velmi krátkou (až bodovou) hřbetnici. Dalo by se očekávat, že při detekci referenčních linií by tyto objekty nemusely být kvůli své velikosti detekovány, resp. by mohly být potlačeny při generalizaci. Popsaná situace však nenastává a referenční hřbetnice byly ve většině polygonů s bodovou hřbetnicí detekovány, tzn. na celkové hodnocení míry shody na úrovni všech polygonů to vliv nemá. Tyto situace však pravděpodobně částečně ovlivnily detailnější hodnocení míry shody z pohledu tvarové a polohové podobnosti. V nezanedbatelném množství polygonů s bodovou hřbetnicí byly totiž detekovány liniové referenční hřbetnice, jejichž délka se neblíží bodové hřbetnici. V takových případech pak vychází míra tvarové shody velmi nízká. To může být dáno procesem vzniku referenčních hřbetnic, při kterém je snahou získat spíše delší linie k porovnání a zároveň velmi detailními vstupními daty (DMR 5G).

Co se týče kartografických linií, je třeba si uvědomit, že ČTK nejsou přímo součástí kartografických reprezentací, avšak byly z nich určitým způsobem odvozeny, přičemž i tento proces má pouze určitou spolehlivost a nemusí odhalit všechny hrany, resp. určitý typ hran může odhalovat lépe než jiný. Postupy pro odvození jednotlivých typů kartografických linií se lišily z hlediska složitosti, což má pravděpodobně vliv na správnost odvozených linií. Nejsložitější postup pro odvození byl použit pro údolnice, pro které bylo třeba nejprve vytvořit nové geometrické objekty, a až na základě těchto objektů bylo možné vybrat situace odpovídající údolnicím a následně odvodit novou reprezentaci. Postup pro odvození hřbetnic byl mírně jednodušší, jelikož potřebná data k nalezení situací odpovídajících hřbetnicím již byla přímo součástí dat kartografických reprezentací. To znamená, že postup zahrnoval o krok méně – výběr situací potenciálně odpovídajících hřbetnici a odvození nové geometrické reprezentace. Odvození lomových hran bylo nejjednodušší a spočívalo pouze ve výběru horních hran, jejichž uspořádání ukazovalo na výskyt lomové hrany (viz kapitolu [2.2](#)). Proces pro odvození údolnic zahrnuje více kroků a každý dílčí krok má vliv na výsledek, který je tak ovlivněn velkým množstvím faktorů (například volby parametrů a mezních hodnot). V případě lomových hran je proces jednodušší a výsledek není tak ovlivněn tolika faktory. To však nutně nemusí znamenat, že odvození lomových je přesnější než u údolnic, a to ze dvou důvodů. Jednak proto, že využití komplexnějších postupů pro odvození údolnic a hřbetnic v sobě zahrnují řadu kroků, kterými eliminují vybrané nežádoucí situace (hlavně situace, kdy se například jako hřbetnice označí hrana, která hřbetnicí není) dané různými specifickými uspořádáními dat. Druhým důvodem jsou samotné kartografické reprezentace lomových hran, které občas záměrně neodpovídají realitě, ale slouží k vizuálnímu doplnění kresby (viz výše, obr. č. [49](#)).

V situaci, kdy z výsledků vyplývá, že shoda (linie z obou datových sad v jednom polygonu) nastává jen ve velmi malé části dat, je tedy poměrně zbytečné hodnotit detailní polohovou přesnost linií, resp. vytvářet složitou a komplexní metodiku pro hodnocení polohové shody.

Z výsledků práce plyne, že kartografické reprezentace částečně „realitě“ skutečně odpovídají a určitou topografickou informaci nesou. Zároveň však také platí, že nelze data odvozená z kartografických reprezentací považovat za vhodný zdroj topografické informace z důvodů neúplnosti. Kartografické linie by bylo možné určitým způsobem využít k doplnění dat potřebných pro případnou automatizaci kresby skalních šraf. Tedy v případě, kdy daný polygon obsahuje kartografickou linii a zároveň referenční linii a lze tak předpokládat skutečný výskyt dané terénní hrany, se využije referenční linie pro doplnění dat.

Součástí diskuse je obvykle srovnání výsledků práce s existující literaturou. Tento úkol je s ohledem na velmi specifické zaměření práce celkem problematický. V české odborné literatuře neexistuje práce, která by se podobným způsobem zabývala analýzou kartografických reprezentací skalních útvarů. Existují práce zabývající se skalními útvary a jejich reprezentací, např. Lysák (2016a), avšak tyto práce se většinou zabývají problematikou znázorňování skal z jiných hledisek. K tématu určení míry shody liniových objektů již literatura existuje, avšak nebyla nalezena práce, která by se přímo zabývala porovnáváním dvojic čar terénní kostry. Detekci čar terénní kostry se sice věnuje řada odborných prací, ale jsou ve většině případů zaměřeny na samotnou detekci hran nebo na porovnání metod pro detekci hran, ale ne specificky na porovnání dvou sad terénních hran vůči sobě.

V obecné rovině se podobnému tématu – návrh metodiky pro porovnání dvojic liniových objektů věnuje práce autorů Li a Goodchild (2011). Ti ve své práci řeší návrh postupu pro určení míry podobnosti liniových objektů pro využití při kombinování liniových dat z různých datových zdrojů. To znamená, že na rozdíl od diplomové práce není cílem jednu sadu linií porovnávat vůči druhé, referenční, a vyjádřit se k míře její správnosti, ale nalézt mezi liniemi shodu s cílem data zkombinovat a získat více informací. Autoři ve své práci analyzují podobnost linií třemi různými přístupy: geometrická podobnost (vzdálenost, tvar), atributová podobnost a topografický přístup. Oproti předkládané diplomové práci autoři využívají i atributovou podobnost, která zahrnuje například podobnost názvů, což je však pro ČTK ve skalních útvarech nepoužitelné. Zároveň pracují i s topologickým přístupem, tzn. využívají prostorových vztahů linií k dalším objektům v okolí. Co se týče analýzy geometrické podobnosti, tak se autoři snaží, aby daný postup zohlednil tvarovou a polohovou podobnost linií (podobně jako v případě této diplomové práce). K hodnocení geometrické podobnosti je v práci využita Hausdorffova vzdálenost (viz kapitolu [2.5.1.2](#)) a úhel mezi liniemi, přičemž velmi zjednodušeně pak platí, že malá vzdálenost linií (měřena Hausdorffovo metrikou) a malý úhel mezi nimi znamenají dobrou shodu. Metodika pro určení míry geometrické podobnosti je v obecné rovině podobná metodice využitě v rámci diplomové práce, resp. oba přístupy se snaží zohlednit podobná kritéria (tvarová, polohová podobnost), ale využívají k tomu rozdílné prostředky. Na rozdíl od diplomové práce autoři totiž předpokládají větší míru shody linií, čemuž odpovídají i použité metody.

V rámci práce byla na základě DMR 5G odvozena sada čar terénní kostry v plochách skalních útvarů. Tato sada čar je poměrně specifickým výstupem, jelikož taková sada linií doposud v žádné podobě neexistovala. Vytvořená datová sada by mohla být využita pro účely digitální kartografie ve státním mapovém díle napříč měřítky. Zároveň mají tyto ČTK potenciál být využity v rámci procesu automatizované tvorby skalních šraf, což navrhuje v rámci své práce Lysák (2016a).

## 5 Závěr

Předkládaná práce se v obecné rovině zabývá analýzou čar terénní kostry v plochách skalních útvarů za využití skalních šraf, které představují kartografickou reprezentaci skalních útvarů v Českém státním mapovém díle. Hlavním cílem práce bylo zjistit, do jaké míry skalní šrafy, vzniklé v zásadě opakovaným překreslováním starých analogových map, používané pro reprezentaci skalních útvarů odpovídají realitě reprezentované DMR 5G a na základě tohoto zjištění se vyjádřit k tomu, nakolik lze automatizovanými postupy z dat DMR 5G a z kartografických reprezentací získat podklad pro automatickou tvorbu skalních šraf.

K dosažení uvedených cílů bylo třeba porovnat dvě datové sady čar terénní kostry a vyhodnotit míru jejich shody. Obě datové sady obsahovaly informace o průběhu tří typů čar terénní kostry – hřbetnic, údolnic a lomových hran, přičemž datové sady se lišily způsobem vzniku, resp. zdrojovými daty. První datová sada byla získána odvozením z dat kartografických reprezentací a vznikla v rámci autorovy bakalářské práce (Kyncl 2020). Na základě toho, jakým způsobem tato sada linií vznikla, jsou tyto linie označovány jako kartografické. Druhá datová sada vznikla na základě DMR 5G, z něžž byly zvolenou metodou odvozeny čáry terénní kostry (dále na základě jejich využití označovány jako referenční linie). Tato datová sada byla využita jako referenční sada, resp. s ohledem na data, z nichž vychází, jako určitá objektivní reprezentace „reality“ s níž byly srovnávány kartografické linie.

V úvodu práce je popsán způsob znázorňování skal na základních mapách využívaný Zeměměřickým úřadem a zároveň jsou uvedeny vybrané problémy limity této metody vzhledem k dalšímu zpracování. Následně je popsán způsob, kterým byly z dat kartografických reprezentací odvozeny čáry terénní kostry, které představují hlavní část analyzovaných dat v této práci. Další náplň teoretické části práce tvoří kapitola věnovaná popisu vybraných metod používaných pro detekci čar terénní kostry s detailnějším popisem metody využití v rámci této práce. Poslední kapitola teoretické části pak pojednává o vybraných postupech digitálního zpracování obrazu, jenž jsou využity pro vytváření referenční sady ČTK.

Praktickou část tvoří dvě velké kapitoly. První z nich se zabývá procesem detekce ČTK v plochách polygonů skalních útvarů na území Česka. Druhá část je potom věnována porovnání kartografických linií s liniemi referenčními. V závěru praktické části jsou uvedeny získané výsledky, na základě kterých jsou vyvozeny určité závěry, které jsou následně diskutovány.

Diplomová práce se zabývá velmi specifickým tématem analýzy skalních útvarů, resp. jejich kartografických reprezentací na území celého Česka a tematicky navazuje na autorovu předchozí práci. Přístup k analýze skalních útvarů je poměrně netradiční a spočívá v určení míry shody dat odvozených z kartografických reprezentací s „realitou“.

V rámci práce byla vytvořena sada tří typů ČTK pro všechny polygony skalních útvarů na území Česka, což je datová sada, která doposud v žádné podobě neexistovala a která má potenciál přispět k automatizované kresbě skalních šraf. Dále byla v rámci práce navržena metodika pro hodnocení míry shody liniových objektů, u kterých se předpokládá nízká míra shody a navržená metodika byla využita pro porovnání kartografických a referenčních linií. Výsledky hodnocení míry shody pak umožnily vyhodnocení kartografických reprezentací a jejich srovnání s „realitou“. Práce svým tématem v obecné rovině odpovídá trendu výzkumu v rámci digitální kartografie, kterým je snaha o automatizaci již existujících tradičních postupů, jelikož její výstupy mají potenciál přispět právě možnostem automatizace.

# Použité zdroje

## Zdroje informací

ALT, H., SCHARF, L. (2006): Computing the Hausdorff Distance between Curved Objects. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 18, 4, 307–320.

ČÚZK (2022): ZABAGED® – Výškopis – DMR 5G. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace. [shorturl.at/hqtwx](https://shorturl.at/hqtwx) (cit. 24. 7. 2022).

DEMEK, J. (1987): *Obecná geomorfologie*. Academia, Praha.

DOUGLAS, D. H., PEUCKER, T. K. (1973): Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature. *Canadian Cartographer*, 10, 2.

EITER, T., MANNILA, H. (1994): Computing Discrete Frechet Distance. [https://www.researchgate.net/publication/228723178\\_Computing\\_Discrete\\_Frechet\\_Distance/link/5714d93908aebda86c0d1a7b/download](https://www.researchgate.net/publication/228723178_Computing_Discrete_Frechet_Distance/link/5714d93908aebda86c0d1a7b/download) (cit. 23. 7. 2022).

HLAVÁČ, V., SEDLÁČEK, M. (1999): *Zpracování signálu a obrazu*. Pracovní verze skriptu v tisku pro studenty FEL ČVUT. Elektrotechnická fakulta, ČVUT, Praha.

CHAMBERS, E. W., WANG, Y. (2013): Measuring similarity between curves on 2-manifolds via homotopy area. *Proceedings of the twenty-ninth annual symposium on Computational geometry*. 425–434.

JAROŠ, J. (2011): *Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování*. Praha, 2011. 86 s. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.

KARIMIPOUR, F., GHANDEHARI, M. (2013): *Voronoi-Based Medial Axis Approximation from Samples: Issues and Solutions*. Department of Surveying and Geomatics Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

KYNCL, G. (2020): *Využití kartografické reprezentace skal ze SMD pro doplnění topografických dat o skalních útvarech v ZABAGED*. Bakalářská práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, PřF UK, Praha.

LI, L., GOODCHILD, M. F. (2011): An optimisation model for linear feature matching in geographical data conflation, *International Journal of Image and Data Fusion*, 2, 4, 309–328

LYSÁK, J. (2015): Digital rock drawing on Czech topographic maps: the current state and historical circumstances. *AUC Geographica*, 50, 2, 193–199.

LYSÁK, J. (2016a): Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování. Dizertační práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, PŘF UK, Praha.

LYSÁK, J. (2016b): An algorithm for automated digital rock drawing in the style used in Czech topographic maps. *AUC Geographica*, 51, 1, 5–16.

NEDAS, K. A., EGENHOFER, M. J., WILMSEN (2007): Metric details of topological line–line relations, *International Journal of Geographical Information Science*, 21, 1, 21-48

O'CALLAGHAN, F. J., MARK, M. D. (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics and Image Processing* 28, 3, 323 – 344.

STANISLAWSKI, L. V., BUTTENFIELD, B. P., DOUMBOUYA (2015): A rapid approach for automated comparison of independently derived stream networks, *Cartography and Geographic Information Science*, 42, 5, 435-448.

WILD, D., KRZYTEK, P., MADANI, M. (1996): Automatic Breakline Detection Using an Edge Preserving Filter. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*. Vienna : ISPRS, 2005. 31, B3, 946–952.

ZHANG, Q., DEREN, L. JIANYA, G. (2002): Shape similarity measures of linear entities, *Geo-spatial Information Science*, 5, 2, 62-67.

## Zdroje dat

ČÚZK (2018): Základní mapa ČR 1:10 000 [online]. Dostupné z URL: <https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/?wmcid=486> (cit. 26. 7. 2022).

ČÚZK (2022): IMAGE služba AGS – Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. Dostupné z URL: <https://ags.cuzk.cz/arcgis2/rest/services/dmr5g/ImageServer> (cit. 26. 7. 2022).

## Seznam příloh

K práci náleží následující přílohy:

**Příloha č. 1:** CD obsahující: elektronickou verzi práce, datové výstupy a použité skripty v jazyce Python 3.6.

**Příloha č. 2:** Grafy empirických distribučních funkcí pro parametry využité k určení míry shody dvojic hřbetnic.

**Příloha č. 3:** Grafy empirických distribučních funkcí pro parametry využité k určení míry shody dvojic údolnic.

**Příloha č. 4:** Grafy empirických distribučních funkcí pro parametry využité k určení míry shody dvojic lomových hran.

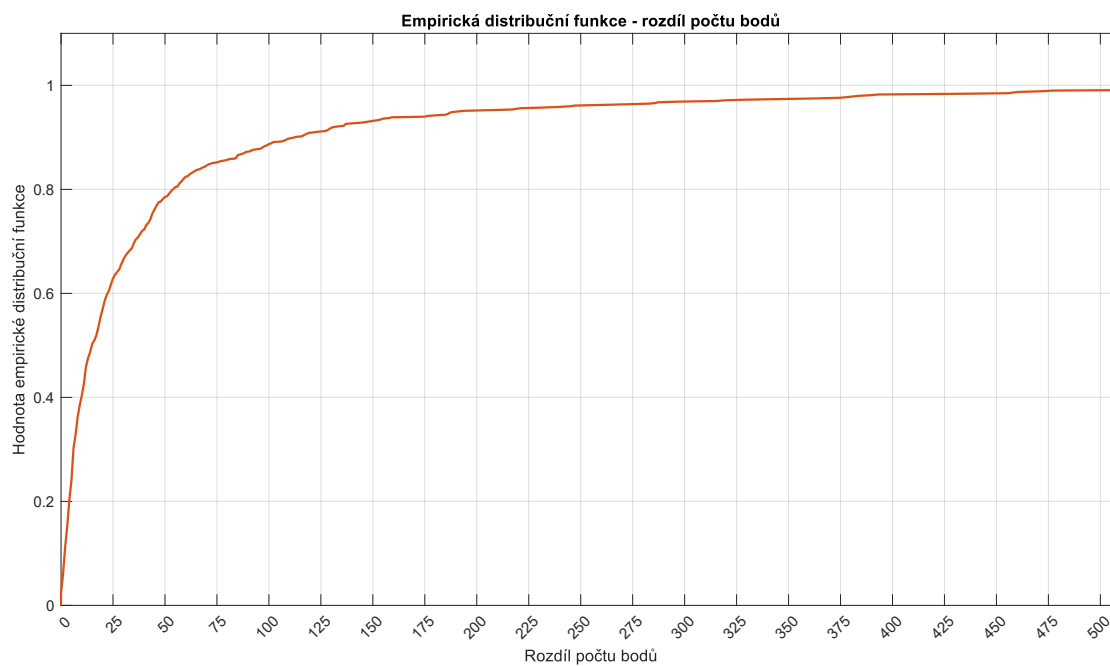
### Ad příloha č. 1

Data uložená na CD jsou rozdělena do 3 složek následovně:

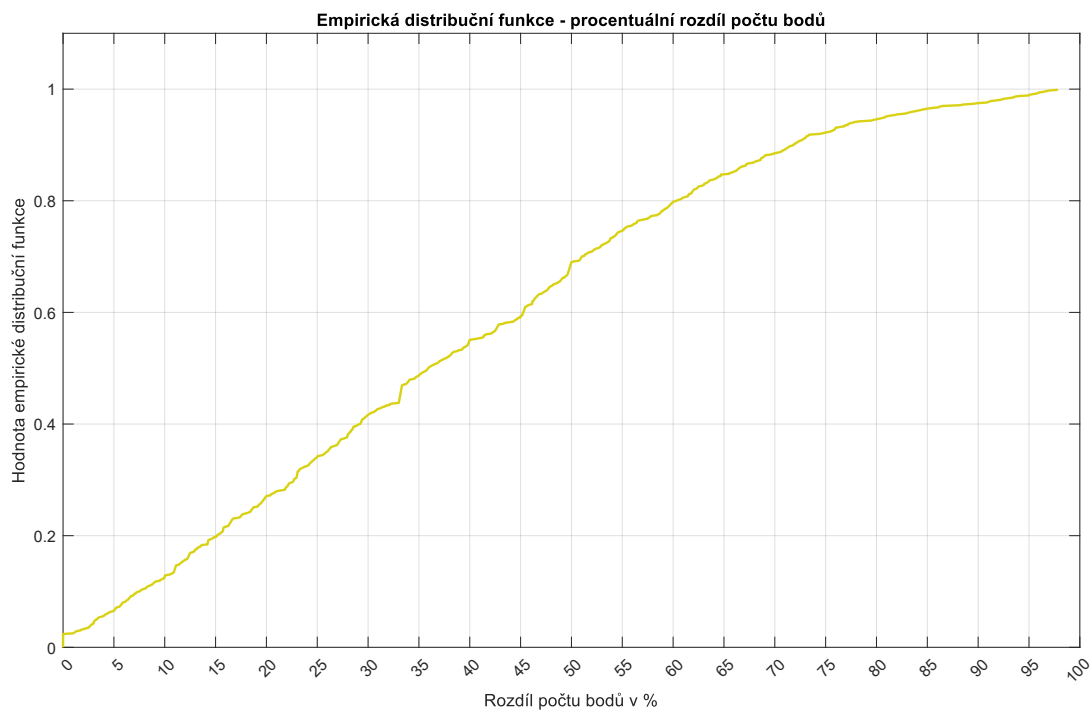
- /skripty – složka obsahující skripty v programovacím jazyce Python 3.6 využité v rámci práce. Součástí složky je soubor skripty\_popis.pdf, který obsahuje stručný popis jednotlivých skriptů.
- /data – složka obsahující vstupní a odvozená data, jejichž stručný popis poskytuje soubor data\_popis.pdf.
- /text – složka obsahující text práce ve formátu \*.pdf.

## A Přílohy

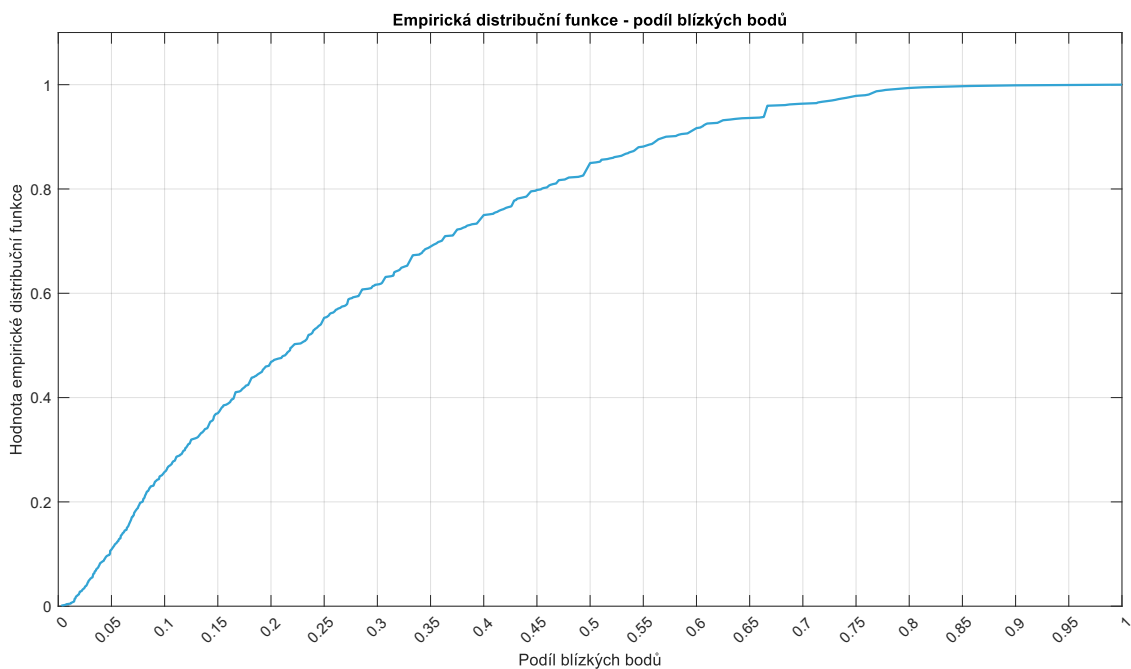
**Příloha č. 2: Grafy empirických distribučních funkcí pro parametry využitá k určení míry shody dvojjíc hřbetnic**



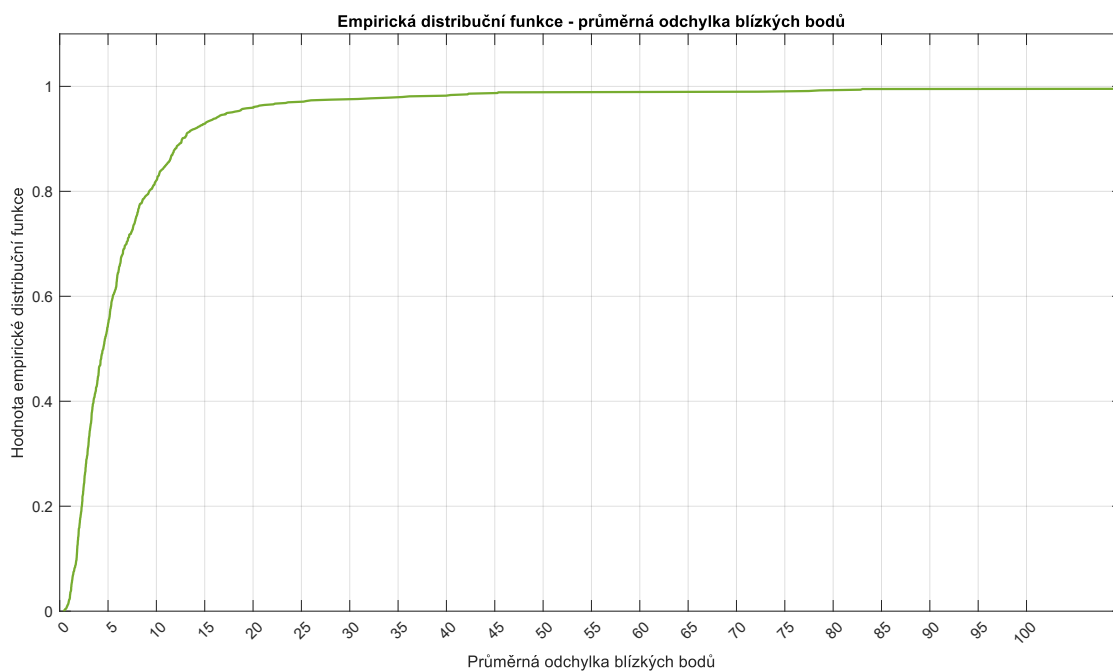
**Obr. A.1:** Empirická distribuční funkce – rozdíl počtu bodů obou datových sad – hřbetnice.  
Pro lepší přehlednost vykreslena část dat obsahující 99 % nejmenších hodnot.



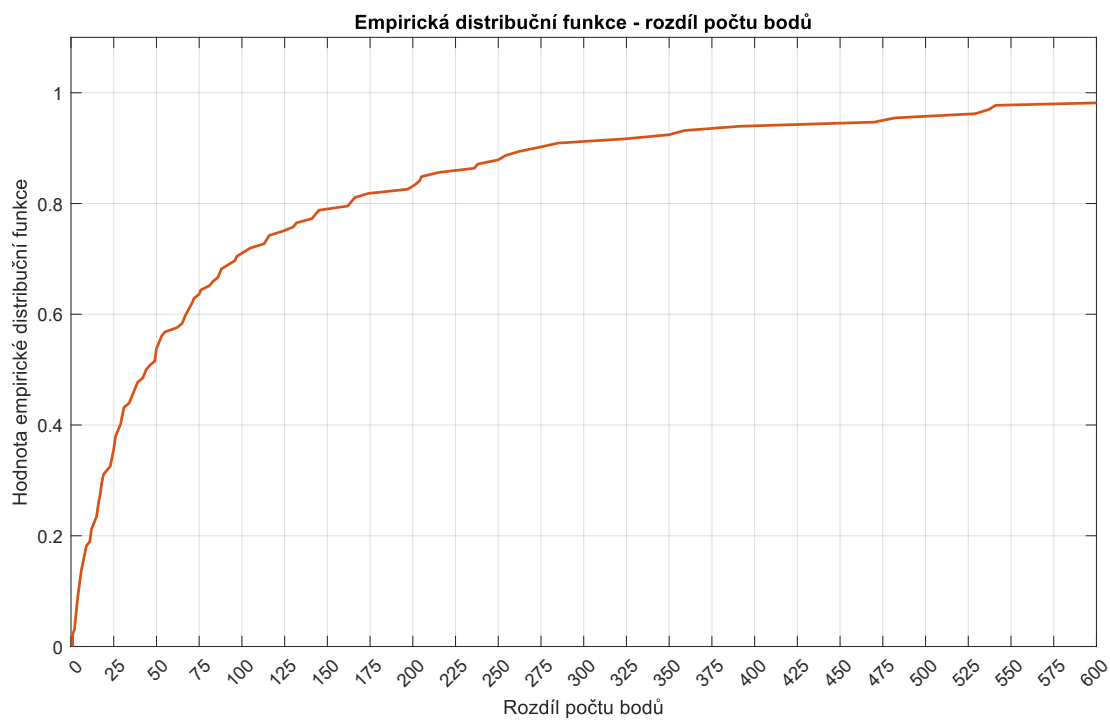
**Obr. A.2:** Empirická distribuční funkce – procentuální rozdíl počtu bodů – hřbetnice.



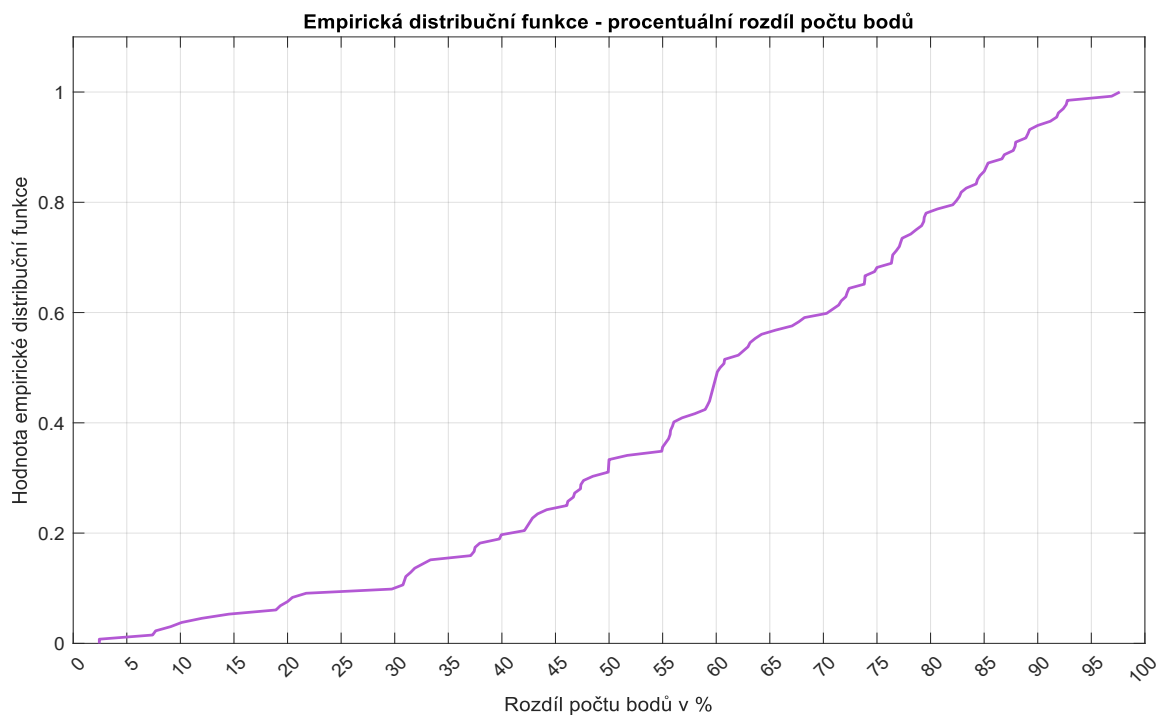
**Obr. A.3:** Empirická distribuční funkce – podíl blízkých bodů – hřbetnice.



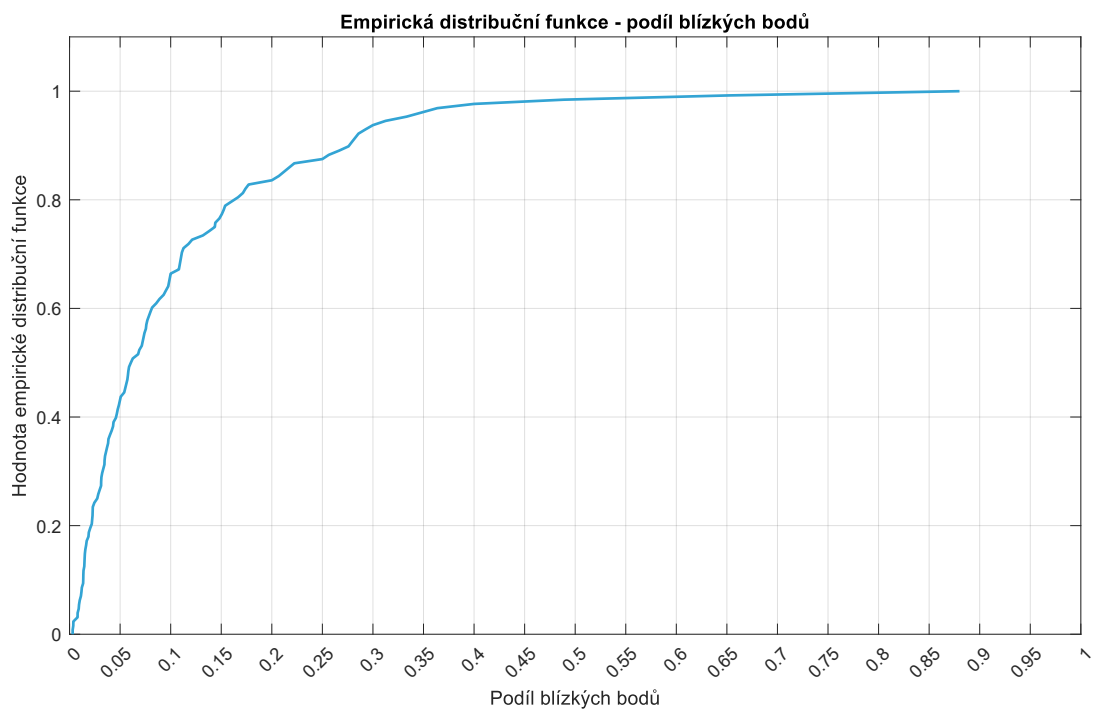
**Obr. A.4:** Empirická distribuční funkce – průměrná odchylka blízkých bodů – hřbetnice.  
Pro lepší přehlednost vykreslena část dat obsahující 99 % nejmenších hodnot.

**Příloha č. 3: Grafy empirických distribučních funkcí pro parametry využitě k určení míry shody dvojic údolnic**

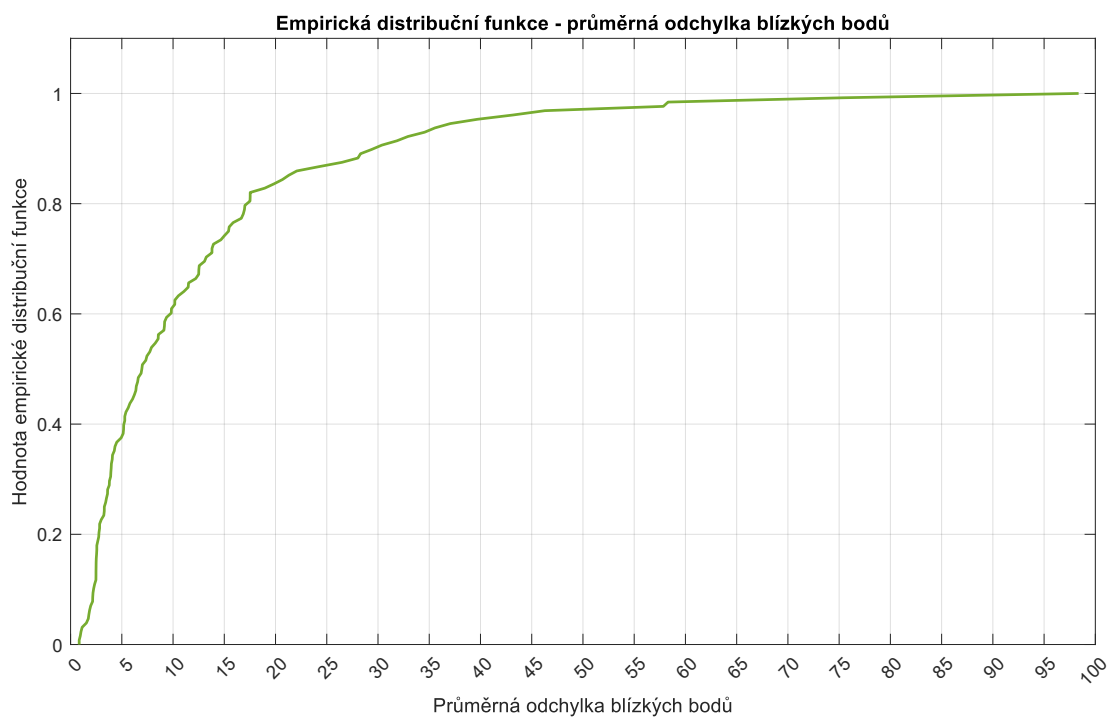
**Obr. A.5:** Empirická distribuční funkce – rozdíl počtu bodů obou datových sad – údolnice.  
Pro lepší přehlednost vykreslena část dat obsahující 99 % nejmenších hodnot.



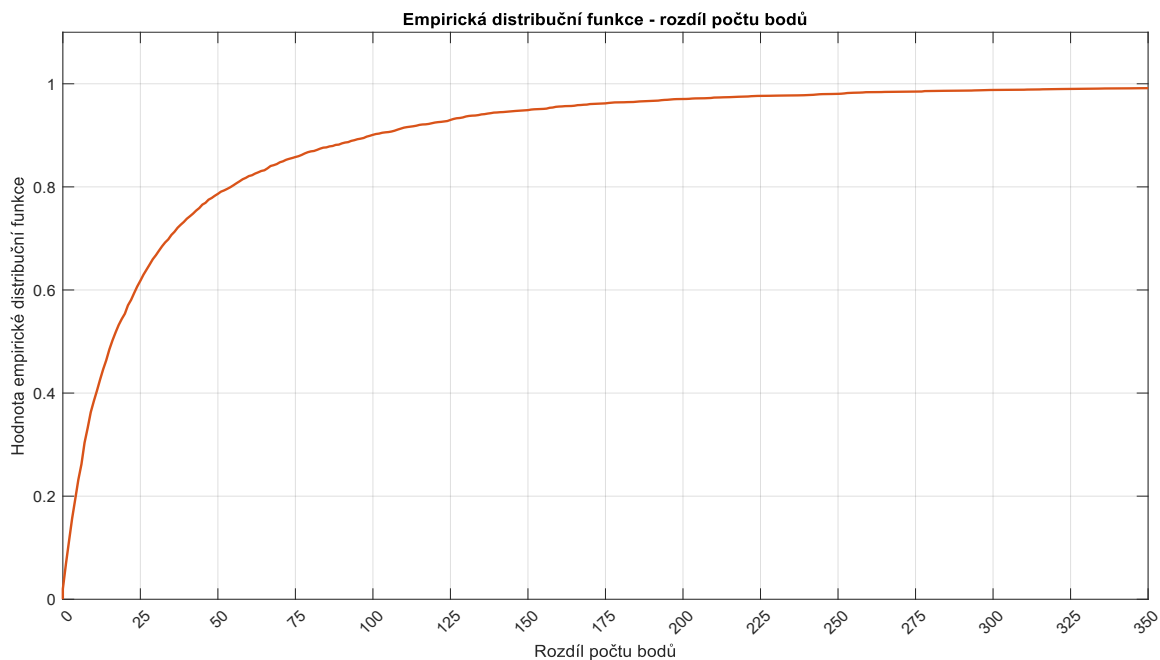
**Obr. A.6:** Empirická distribuční funkce – procentuální rozdíl počtu bodů – údolnice.



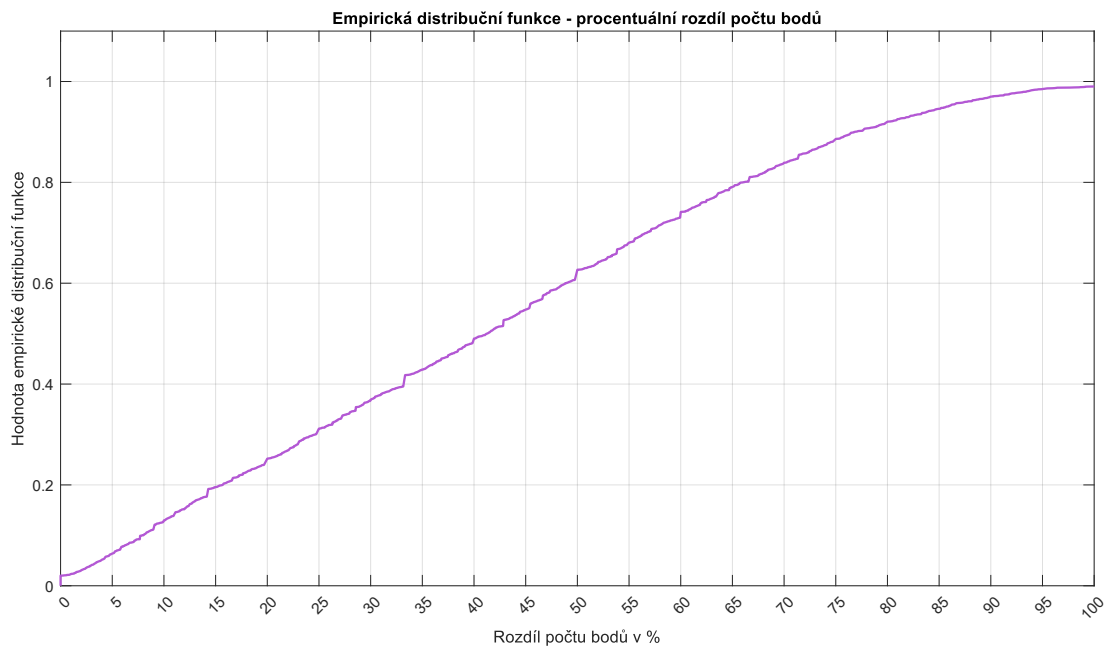
**Obr. A.7:** Empirická distribuční funkce – podíl blízkých bodů – údolnice.



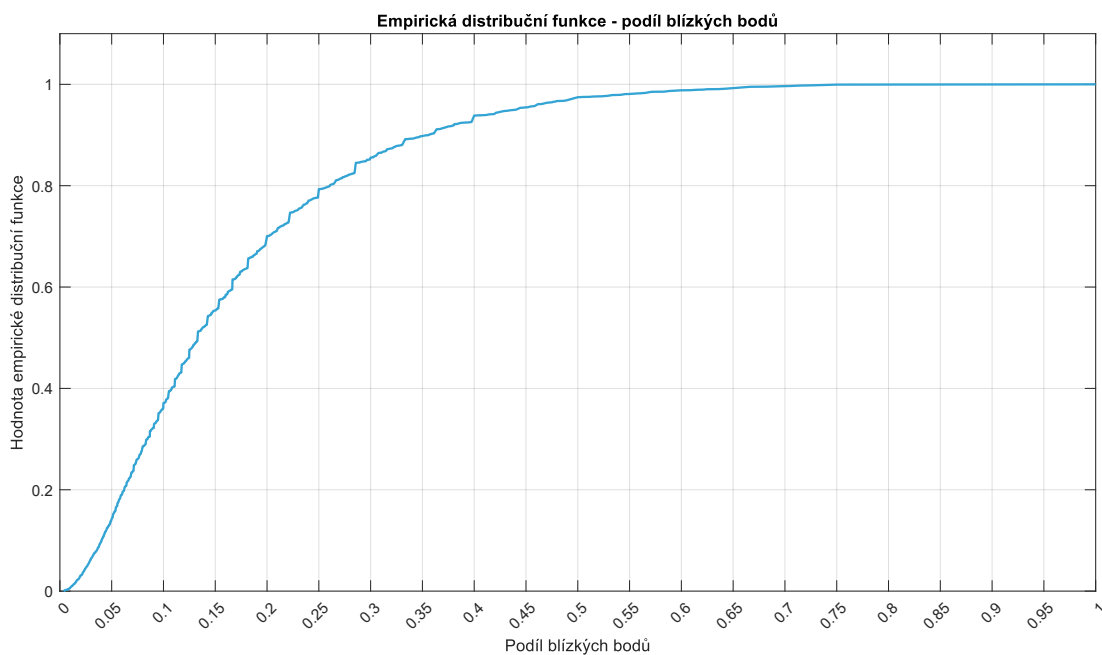
**Obr. A.8:** Empirická distribuční funkce – průměrná odchylka blízkých bodů – údolnice.

**Příloha č. 4: Grafy empirických distribučních funkcí pro parametry využitě k určení míry shody dvojic lomových hran**

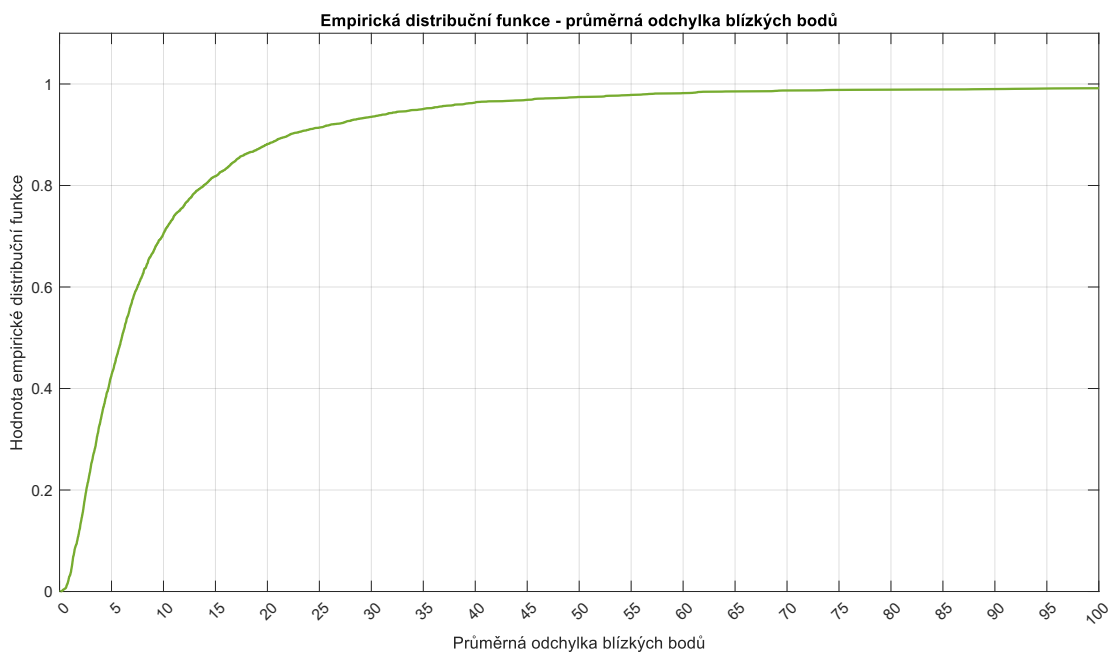
**Obr. A.9:** Empirická distribuční funkce – rozdíl počtu bodů obou datových sad – lomové hrany.  
Pro lepší přehlednost vykreslena část dat obsahující 99 % nejmenších hodnot.



**Obr. A.10:** Empirická distribuční funkce – procentuální rozdíl počtu bodů – lomové hrany.



**Obr. A.11:** Empirická distribuční funkce – podíl blízkých bodů – lomové hrany.



**Obr. A.12:** Empirická distribuční funkce – průměrná odchylka blízkých bodů – lomové hrany.  
Pro lepší přehlednost vykreslena část dat obsahující 99 % nejmenších hodnot.